

**Steuerung von Bewässerungssystemen im Gewächshaus mit Hilfe  
des Phytomonitoring**

**Dissertation**

**zur Erlangung des akademischen Grades**

**doctor rerum horticumarum**

**(Dr. rer. hort.)**

eingereicht an der

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Agr. Evanthia Exarchou

geb. 25.12.1971 in Thessaloniki

Präsident

der Humboldt Universität zu Berlin

Prof. Dr. Jürgen Mlynek

Dekan

der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Prof. Dr. Uwe Jens Nagel

Gutachter: 1. Prof. Dr. Uwe Schmidt

2. Prof. Dr. Siegfried Kleisinger

3. Prof. Dr. Matthias Langensiepen

Tag der mündlichen Prüfung: 23. 03. 2006

---

EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG DER STUDIE.....	6
<b>1. ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE BEWÄSSERUNGSANSPRÜCHE .....</b>	<b>9</b>
1.1. GLOBALE PROBLEME DER WASSERVERFÜGBARKEIT .....	9
1.2. VERHÄLTNIS VON STICKSTOFFVERLUSTEN ZUR QUALITÄT DES TRINKWASSERS .....	11
1.3. INNOVATIVE TECHNOLOGIEN UND KULTURMETHODEN DER GEWÄCHSHAUS - BEWÄSSERUNG .....	13
1.3.1. Bewässerungsverfahren und –systeme zur Wassermengenkontrolle.....	13
1.3.2. Hydroponische Kulturtechnologien in geschlossenen Kreisläufen .....	15
1.3.2.a Offene und geschlossene Bewässerungsführung.....	16
1.3.2.b Produktivität und Qualitätserhaltung .....	18
1.4. WASSERNUTZUNGSEFFIZIENZ IN PRODUKTIONSPROZESSEN .....	19
1.4.1. Integration des WUE .....	21
1.4.2. Auswirkung der Wasserbilanzüberschüsse .....	24
<b>2. DER WASSERSTROM IM SPAC-SYSTEM .....</b>	<b>26</b>
2.1. WASSERBEWEGUNG IM BODEN – WASSERAUFNAHME DER WURZEL .....	26
2.2. WASSERFLUSS IN DER PFLANZE .....	28
2.2.1. Transpirationsprozess im Wasserpotenzialgefälle .....	30
2.2.2. Stomatäre Regelung der Transpirationsintensität .....	34
2.2.3. Einflussfaktoren in der Stomatabewegung .....	35
<b>3. SENSORISCHE UND MODELLIERENDE ERFASSUNG VON WASSERUMSÄTZEN.....</b>	<b>41</b>
3.1. BESTIMMUNG DER WASSERUMSÄTZE IM BODEN/SUBSTRAT .....	43
3.1.1. Messverfahren zur Bewässerungssteuerung bzw. -regelung.....	43
3.1.2. Modellierung der Wasserumsätze durch den Bodenwassergehalt .....	46
3.2. BESTIMMUNG DES WASSERBEDARFS AN DER PFLANZE.....	48
3.2.1. Technische Erfassung von Pflanzendaten .....	48
3.2.2. Transpirationsmodelle .....	52
3.3. BESTIMMUNG DER WASSERANFORDERUNGEN AUS DEN KLIMABEDINGUNGEN..	58

3.3.1.	Indirekte Erfassung durch Messung der Umweltfaktoren .....	58
3.3.2.	Klimamodelle .....	60
3.4.	BEWERTUNG DER SENSOREN .....	63
3.4.1.	Bodenfeuchtigkeitssensoren.....	63
3.4.2.	Sensoren zur Pflanzendatenmessung.....	66
3.5.	SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DER BEWERTUNG DER SENSOREN UND MODELLE .....	70
3.5.1.	Geeignete Messverfahren im SPAC-System.....	70
3.5.2.	Modellierungsansprüche zur exakten Bestimmung des Wasserumsatzes	73
<b>4.</b>	<b>PHYTOMONITORING UND BEWÄSSERUNG NACH BESTANDS- TRANSPIRATIONSSUMMEN .....</b>	<b>75</b>
4.1.	ABLEITUNG DES VORHABENS.....	75
4.2.	VERSUCHSZIEL .....	76
4.3.	MATERIAL UND METHODEN.....	77
4.3.1.	Auswahl der Messverfahren zur Erfassung von Wasserbilanzen.....	77
4.3.2.	Versuchsort.....	83
4.3.3.	Technischer Aufbau der Versuchstation in Berlin.....	83
4.4.	SENSTOREST ZUR MESSUNG VON WASSERUMSÄTZEN .....	85
4.4.1.	Räumliche und zeitliche Repräsentativität der Saugspannungsmesswerte	85
4.4.2.	Erfassungsgenauigkeit von Verdunstungsmengen der Gaswechsellmethode .....	88
4.4.3.	Vergleich von Saftstrommessung und Gaswechsellmessung.....	91
4.5.	ERFASSUNG VON TRANSPIRATIONSSUMMEN IN PFLANZENBESTÄNDEN .....	93
4.5.1.	Bestandstranspirationssummen von <i>Capsicum anuum</i> .....	93
4.5.1.a	Versuchsaufbau .....	93
4.5.1.b	Versuchsdurchführung .....	94
4.5.1.c	Ergebnisse .....	97
4.5.2.	Bestandstranspirationssummen von <i>Lycopersicon esculentum</i> .....	100
4.5.2.a	Versuchsaufbau .....	100
4.5.2.b	Versuchsdurchführung .....	100
4.5.2.c	Ergebnisse .....	101
4.5.3.	Bestandstranspirationssummen von <i>Gerbera jamensonii</i> .....	102
4.5.3.a	Versuchsaufbau .....	102

---

4.5.3.b	Versuchsdurchführung .....	103
4.5.3.c	Ergebnisse .....	103
4.6.	AUTOMATISCHE BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG DURCH GEMESSENE TRANSPIRATIONSSUMMEN .....	105
4.6.1.	Kurzzeitanalysen von <i>Lycopersicon esculentum</i> .....	105
4.6.1.a	Versuchsaufbau .....	105
4.6.1.b	Versuchsdurchführung .....	106
4.6.1.c	Ergebnisse .....	106
4.6.2.	Bewässerungssteuerung von <i>Gerbera jamensonii</i> mit einer angestrebten Überschussmenge unter hohen Einstrahlungsbedingungen.....	111
4.6.2.a	Versuchsaufbau .....	111
4.6.2.b	Versuchsdurchführung .....	111
4.6.2.c	Ergebnisse .....	112
4.6.3.	Bewässerungssteuerung von <i>Lycopersicon esculentum</i> mit limitierenden Überschusswassermengen .....	114
4.6.3.a	Versuchsaufbau .....	114
4.6.3.b	Versuchsdurchführung .....	115
4.6.3.c	Ergebnisse .....	115
4.6.4.	Bewässerungssteuerung von <i>Cucumis sativus</i> mit limitierenden Überschusswassermengen .....	118
4.6.4.a	Versuchsaufbau .....	118
4.6.4.b	Versuchsdurchführung .....	118
4.6.4.c	Ergebnisse .....	118
4.7.	STICKSTOFFDYNAMIK IN DER BEDARFSGERECHTEN BEWÄSSERUNGS- STEUERUNG .....	121
4.7.1.	N <sub>min</sub> -Gehalt im Substrat und im Überschusswasser .....	121
4.7.2.	EC- und pH-Werte im Drainagewasser und im Substrat .....	124
4.7.3.	N <sub>t</sub> -Gehalt in Blättern, Stängeln und Früchten .....	128
4.8.	WASSEREFFIZIENZ IN DER BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG .....	129
4.8.1.	Effiziente Stoffproduktion in der transpirationssummengesteuerten Bewässerung.....	129
4.8.2.	Produktivität und Pflanzenwachstum.....	130
4.8.2.a	Bewässerung mit definierter Drainagemenge .....	131
4.8.2.b	Bewässerung mit minimaler Drainagemenge.....	132

---

<b>5. DISKUSSION - SCHLUSSFOLGERUNGEN.....</b>	<b>135</b>
5.1. PHYTOMONITORINGTECHNOLOGIE IM OPTIMIERUNGSPROZESS DER PRODUKTION .....	135
5.2. BEWERTUNG DER AUSGEWÄHLTEN MESSTECHNIK.....	136
5.2.1. Bewässerungsregelung durch Einsatz des Tensiometers.....	136
5.2.2. Bestimmung der pflanzlichen Wasserumsätze durch die Saftflussrate .....	138
5.2.3. Direkte Transpirationsmessung durch die Gaswechsellmethode.....	140
5.2.3.a Repräsentativität und Exaktheit der Messwerte .....	140
5.2.3.b Langzeitüberprüfung der Exaktheit des Messverfahrens .....	142
5.3. BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG NACH GEMESSENEN TRANSPIRATIONSSUMMEN	144
5.3.1. Steuerung bei hoher Einstrahlung unter nordeuropäischen Gewächshausbedingungen.....	144
5.3.2. Steuerung bei hoher Einstrahlung unter südeuropäischen Gewächshausbedingungen.....	147
5.3.3. Bedarfsgerechte Bewässerung ohne Salzakkumulationen im Substrat ....	148
5.4. OPTIMIERUNGSANSÄTZE EINER BEDARFSGERECHTEN BEWÄSSERUNGSSTEUERUNG .....	151
ZUSAMMENFASSUNG .....	156
SUMMARY .....	159
LITERATURVERZEICHNIS .....	162
ANHANG A: VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN .....	176
ANHANG B: VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	182
ANHANG C: TABELLEN UND ABBILDUNGEN ZUM VERSUCHS-AUFBAU .....	185
ANHANG D: VERZEICHNIS DER VERWENDETEN GRÖßEN UND ABKÜRZUNGEN .....	193
ERKLÄRUNG .....	198
BEDANKUNG .....	200

---

## **EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG DER STUDIE**

Der Produktionsgartenbau im Gewächshaus ist gekennzeichnet durch einen hohen Einsatz an Energie, Wasser und Nährstoffen. Höhere Anforderungen an die Qualität der Produkte und des Produktionsprozesses erfordern die genaue Steuerung des Klimas und der Bewässerung und Düngung. In vielen Regionen Europas wird vor allem das für die Bewässerung notwendige Wasser in der entsprechenden Qualität zum begrenzenden Faktor. Neben der Forderung einer hohen Wasser-verteilgenauigkeit bei der Bewässerung steht die Bestimmung des Pflanzenwasser-bedarfs im Mittelpunkt der Betrachtung.

Die rasante Entwicklung von Elektro-, Sensor- und Computer- sowie Kommunikationstechnik führt auch im Bereich der Technik im Gartenbau zur Überlegung, industrielle Innovationen schneller zu übernehmen (SCHMIDT, 1996). Das Angebot an marktreifen Produkten im Bereich der Klimaregelung erscheint als ausgereift und ausreichend. Die Bewässerung und Düngung ist regeltechnisch noch mit Nachholbedarf behaftet, insbesondere in Bezug auf die Abstimmung vielfältiger Kulturen in deutschen Gartenbaubetrieben (DOMKE, 1994). Die niedrigen Wasser- und Düngemittelkosten im Vergleich zum hohen Marktwert der Kulturen, der steigende Übergang zu erdlosen Kulturverfahren, die hohe Wasser- und Nährstoffkapazität der Wurzelzone, welche die präzise kurzfristige Kontrolle der Bewässerung einschränkt, aber auch das Problem, bei der Tropfbewässerung, kleine Wassermengen und feste Düngemittel einzusetzen, sind die wichtigsten Gründe für einen weiterhin bestehenden Bedarf an Forschung und Entwicklung für hoch entwickelte Kontrollstrategien im Gewächshausanbau (KLÄRING, 2001).

Zur Steigerung der Unterglasproduktion ist die Verwendung hydroponischer Anbauverfahren von großer Bedeutung. Optimale Wachstumsbedingungen bei gleichzeitiger Senkung der ökonomischen Anforderungen können durch den Einsatz solcher Anbauverfahren, verbunden mit dem Einsatz der Mess-, Steuer- und Regeltechnik, erreicht werden. Diese Anbausysteme werden meist offen betrieben, um bei unsicheren Regelungstechniken - über den Wasserverbrauch oder die Leitfähigkeit - Anreicherungen oder Mangel einzelner Nährstoffe zu vermeiden (SCHACHT et al., 1995).

Das System „Boden-Pflanze-Atmosphäre“ (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC) wird von dynamischen Veränderungen und starken Interaktionen der

Teilkomponenten charakterisiert. Um eine präzise Bewässerung mit effizienter Wassernutzung erreichen zu können, ist ein Steuerungssystem erforderlich, dass das gesamte System überwacht und aufzeichnet.

Besonders bei Kulturtechnologien ohne ausreichendem Pufferungsvermögen für Wasser und Nährstoffe (Dünnschichtkulturen, hydroponische und aeroponische Anbauverfahren usw.) ergibt sich die Notwendigkeit, moderne Sensorik und Methoden der Energie- und Massenstromanalyse anzuwenden, um den aktuellen Wasserumsatz zu bestimmen. Dies gilt besonders in Ländern, in denen Wasser bereits heute zu den begrenzenden Faktoren der gärtnerischen Produktion gehört (wie z.B. in mediterranen Ländern). Aufgrund der hohen Einstrahlungsbedingungen und hohen Temperaturen werden große Wassermengen in der Vegetationsperiode umgesetzt.

Neben der effizienten Wassernutzung muss die Bewässerungssteuerung eine Nährstoffauswaschung in tieferen Bodenschichten oder auch eine Salzanreicherung in hydroponischen Anbausubstraten verhindern. Die bei der offenen Steinwoilkultur übliche 30%ige Überschussbewässerung bedeutet eine jährliche Stickstoffauswaschung von bis zu 1000 kg N/ha (VAN NOORDWIJK, 1990 in: SCHACHT et al., 1995).

Untersuchungen und Entwicklungen zur Optimierung der Prozesskontrolle und –steuerung im Gewächshaus konzentrieren sich auf neue Methoden der Verknüpfung von klimatischen Faktoren und des Wasserstatus der Pflanzenwurzelzone mit Hilfe von geeigneten Messinformationen. Aussagen über den Nährstoffzustand der Pflanze und die Fruchtqualität werden meistens durch Laboranalysen gewonnen. Unter Nutzung von physikalischen oder mathematischen Modellen wird versucht, den Zustand der Pflanze zu beschreiben. Ein anderer Ansatz ist die Nutzung von Messinformationen an der Pflanze, um den Stoff- und Energiebedarf zu ermitteln („Speaking Plant“ Konzept, Phytomonitoring). Die Einbindung phytometrischer Messinformationen in technische Regelsysteme, als Regelgrößen oder Regelrestriktionen, bildet die Basis für die Technologie des Phytocontrol und rückt in den Mittelpunkt des Interesses der diesbezüglichen Forschung und Entwicklung.

Neuentwickelte Sensoren (Saftflusssensoren, Stängeldurchmessersensoren, Blattgewebetemperatursensoren) werden zur Messung von pflanzlichen Größen eingesetzt, die zur Bestimmung des Pflanzenwachstums und des momentanen Energie- und Massenflusses dienen (NOVAK, 1997). Mit dem Phytomonitoring

können physiologische Prozesse und Größen der Pflanze direkt erfasst und zur Optimierung der Pflanzenumgebung verwendet werden.

Im Rahmen des Dissertationsvorhabens wird deshalb nach möglichen Methoden der Steuerung von Bewässerungssystemen, nach gemessenen pflanzlichen Reaktionen, gesucht. Für die Bearbeitung dieses Themas werden folgende Schwerpunkte definiert:

- Bewertung vorhandener Messverfahren, die der Bewässerungssteuerung im Gewächshaus dienen.
- Darstellung der Modellansätze zur Bestimmung der Wasserumsätze von Pflanzenbeständen.
- Möglichkeiten der Datenerfassung an der Pflanze zum Zweck der Erfassung von Wasserumsätzen.
- Anwendung eines neuen Messinstruments zur Messung der Transpiration.
- Untersuchungen der neuen Transpirationsmessmethode an verschiedenen Gemüsekulturen mit hohen Wasserumsätzen in unterschiedlichen Substraten.
- Entwicklung einer Bewässerungssteuerung nach dem Prinzip des „Phytocontrol“.
- Untersuchungen zur Anwendbarkeit des neuen Verfahrens an Zierpflanzen in Regionen mit hohen Wasserumsätzen.
- Untersuchungen zur Nährstoffdynamik bei bedarfsgerechter Bewässerung.
- Untersuchungen zur Wassernutzungseffizienz in der neuen Steuerungsmethode.



# 1. ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE BEWÄSSERUNGSANSPRÜCHE

## 1.1. Globale Probleme der Wasserverfügbarkeit

Das Problem der Wasserknappheit betrifft die meisten Länder auf der Welt. Die verwendeten Wassermengen sind größer als diejenigen, die über Niederschläge zurückgeführt werden (CZIZINSKY, 1993). Die Gründe für diesen Wassermangel liegen - neben der weit verbreiteten Sorglosigkeit im Umgang mit den natürlichen Wasserressourcen - vornehmlich im Bevölkerungswachstum und der damit verbundenen Nachfragesteigerung (Nahrungsmittelproduktion, Trinkwasser). Auch der industrielle Aufschwung in Regionen mit defizitärer Wasserbilanz bringt ein ernstes Problem mit sich.

Die eingeschränkten Niederschläge bezüglich der globalen Aufwärmung verursachen weitere Änderungen, Variabilitäten und Unsicherheiten der Wasserbilanz und verstärken die existierende Wasserkrise auf nationaler und globaler Basis. In der Zukunft werden die Wasserqualität und –quantität und dementsprechend auch die Wasseranforderungen vom Klimawechsel sehr stark beeinflusst. Die durch die Klimaveränderung verursachten Änderungen in den Evapotranspirationsraten, den Bodenwassergehalten und der Frequenz der Wetterphänomene (Schneefall, Sturm, Flut) beeinflussen den hydraulischen Kreislauf (Abb. 1).

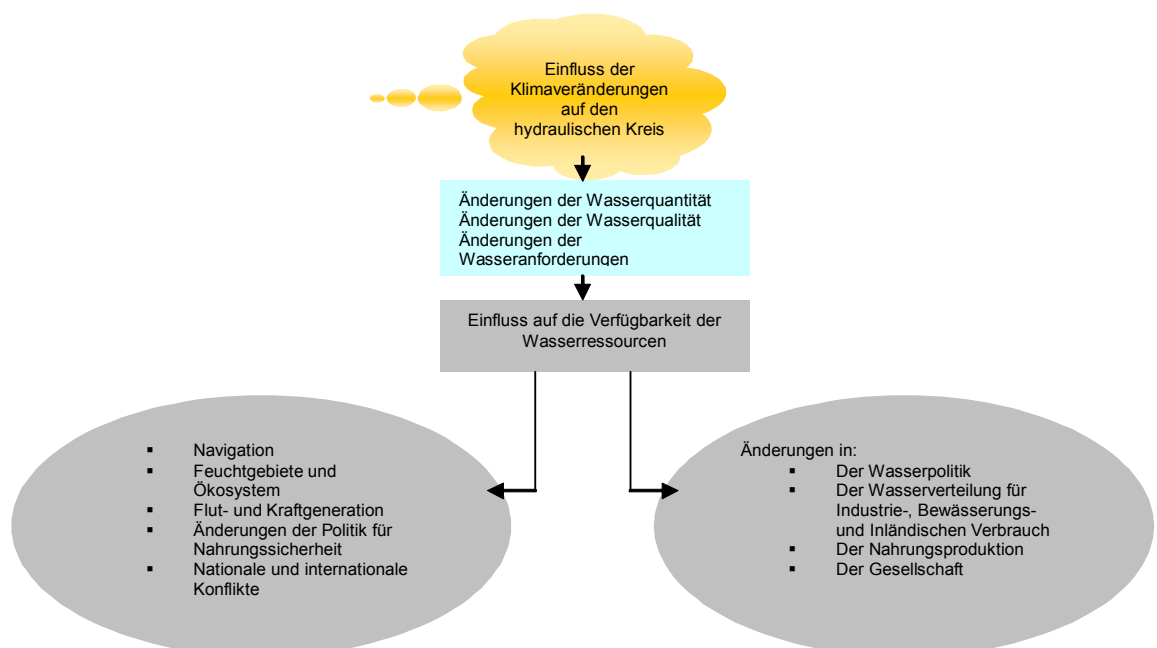


Abb. 1: Einflüsse der Klimaveränderung auf den hydraulischen Kreis (RAGAB, 2002)

Es wird erwartet, dass die Veränderungen über die Wasserverfügbarkeit Einfluss auf, z.B. Flussströmungen, Navigation, Energiegewinnung und Ökosysteme haben werden. Diese Verfügbarkeitsminderungen werden ebenso Änderungen in der Wasserpolitik, der Nahrungsproduktion und der Nahrungssicherheit nach sich ziehen und führen zu nationalen und internationalen Konflikten (RAGAB, 2002).

Viele Länder der Europäischen Union (EU) leiden unter Wasserknappheit. In Spanien und Italien ist der Index, der das Verhältnis von Wasserquellen pro Person kennzeichnet, relativ niedrig (2.800 und 3.200 m<sup>3</sup>/Person/Jahr). In manchen Regionen Spaniens fällt der jährliche Wert sogar bis auf 500 m<sup>3</sup>/Person. In Frankreich werden jährlich 3.200 m<sup>3</sup>/Person umgesetzt. Infolge der stark steigenden Bevölkerung wird sich die Wasserverfügbarkeit in den nächsten Jahren auf weniger als 1000 m<sup>3</sup>/Person/Jahr einschränken (ANGELAKIS et al., 1997). Durch geringe und ungleich verteilte Niederschläge, hohe Temperaturen bei gleichzeitig steigendem Bedarf an Wasser in der landwirtschaftlichen Bewässerung und in der Tourismusbranche, ergibt sich in der mediterranen Region, besonders in den Sommermonaten, eine unausgeglichene Wasserbilanz, als in den zentralnördlichen Ländern Europas (TCHOBANOGLIOUS et al., 1996 in: ANGELAKIS et al., 1997). Aus den klimatischen Daten resultiert, dass sich die Niederschläge in Nordeuropa, im Gegensatz zu den südlichen Ländern Europas, erhöhen. Die meisten Niederschläge fallen dort nur in der Herbstzeit (RAGAB, 2002).

Der Wasserverbrauch in den EU-Ländern konzentriert sich auf drei Sektoren: Industrie, Landwirtschaft und inländischer Verbrauch (Tab. 1).

Tab. 1: Jährlicher EU-Wasserbedarf in verschiedenen Sektoren (WILLIAMS und MUSCO, 1992 in: ANGELAKIS et al., 1997)

<b>Sektoren</b>	<b>Verbrauch (km<sup>3</sup>/Jahr)</b>
<i>Industrie</i>	
• Kühlung	105,8
• Verarbeitung	21,3
<i>Agrarwirtschaft</i>	
• Bewässerung	74,5
• Nutzvieh	0,9
<i>Inländischer Verbrauch</i>	25,7
<b>Gesamt</b>	<b>228,2</b>

Während in der Industrie und als Trinkwasser insgesamt relativ geringe Mengen eingesetzt werden, die zudem leicht einen hohen Wasserpreis erzielen lassen (low quantity, high value use), ist die Wasserverwendung für die landwirtschaftliche Be-

wässerung (high quantity, low value use) reziprok (BRISCOE, 1997). Die landwirtschaftliche Bewässerung verbraucht weltweit über zwei Drittel (69 %) (WOLTER, KANNDIAH, 1996) oder mehr (bis 90 %) der jährlichen Wasserentnahmen (in: MANIG, 1998). Im Südwesten Floridas schlug eine Wassermanagement-Agentur z.B. damals vor, dass bis zum Jahre 2000 die agrarwirtschaftlichen Operationen die Wassereffizienz der vorhandenen Bewässerungssysteme von 40 % auf 85 % erhöhen sollten (GRADDY, 1990 in: CZIZINSKY, 1993). Nach Angaben des FAO-Aquastat (1996) werden weltweit ca. 254 Mio. ha (17,4 %) der gesamten landwirtschaftlich genutzten Flächen der Welt bewässert. Auf dieser Fläche werden 40 % der globalen Nahrungsmittel erzeugt. In Europa werden nur 4 % mit Mikrowässerung bewässert, wobei bei 61 % der Flächen die Beregnungsmethode und bei 35 % die Oberflächenbewässerungsmethode eingesetzt werden (SOURELL, 1998).

In den letzten 40 Jahren wurden große Investitionen in die Bewässerung getätigt. Allein die Weltbank gab von 1950 bis 1993 Kredite in Höhe von 31 Mrd. US-Dollar für Bewässerungsprojekte aus. Auch in den Ländern Europas wurden staatliche Förderungen zur Verbesserung der Wassernutzung investiert. Das Bundesland Hessen hat (zwischen 1993 und 1998) ca. 8,5 Mio. DM für wasser- und energiesparende Bewässerungstechniken - und somit auch zur Modernisierung der Beregnungstechnik - aufgewandt (SOURELL, 1998).

In Anlehnung an die EC-Richtlinie 91/271/EEC (über die Behandlung der urbanen Abwässer) orientieren sich die Länder der EU auf die Integration der Abwässer in die Bewässerung. In Israel ist die Rückführung von behandelten Abwässern in den Wasserkreislauf und deren Einsatz zu Bewässerungszwecken weit entwickelt (ANGELAKIS et al., 1997).

## **1.2. Verhältnis von Stickstoffverlusten zur Qualität des Trinkwassers**

In Gebieten Westeuropas mit intensiver Agrarproduktion herrscht eine generelle Sorge über die Bedrohung der Wasserqualität. Diese Bedrohung ergibt sich aus dem Stickstoffaustrag aus der Tierproduktion und den extensiven und nicht bedarfsgerechten Einsatz von Düngemitteln in der Kulturproduktion (TEN BERGE et al., 2002). Die meisten Kulturmethoden des intensiven Anbaus sind gekennzeichnet von einem enormen Verlust an Stickstoffmengen. Nach Angaben von EVERAARTS et al. (1996b) verbleiben z.B. nach der Ernte die Hälfte der eingesetzten Stickstoffmengen einer Blumenkohlkultur im Feld (in: NEETESON et al., 1999). Die Agrarpro-

duzenten setzen große Mengen an Stickstoffdünger ein, um höhere Erträge besserer Qualität zu erreichen. Die Emission von Stickstoffmengen in der Agrarproduktion beeinflusst die Qualität der Atmosphäre, des Bodens- und des Oberflächenwassers und mindert die Prozessqualität.

Der starke Ablauf von überschüssigen Wassermengen in offenen Bodenkulturen (Feld- sowie Gewächshausproduktion) ist mitverantwortlich für die Umweltbelastung. Im Versickerungsweg des Wassers im Boden befinden sich prinzipiell Dünge- und Pestizidrückstände. Diese werden durch das versickernde Wasser in das Grundwasser eingeleitet. Ein weiterer Teil dieser Rückstände wird in die obere Schicht des Bodens eingelagert. Die damit verbundene Salzakkumulation verschlechtert die Qualität des Bodens und belastet den Anbauer mit zusätzlichen Kulturarbeiten. Zusätzlich wird der Boden mit bodenbürtigen Krankheiten belastet, da er einseitig genutzt wird (Einkultur-Prinzip). In temperierten Bodenbereichen werden die  $\text{NO}_3^-$ -Ionen von den Bodenkolloiden nicht absorbiert und verbleiben in der Bodenlösung. Durch die Wasserbewegung werden diese Ionenmengen durch das Bodenprofil transportiert. Auch  $\text{NH}_4^+$ -Ionen und organisch gebundener Stickstoff wurden in Ablaufmengen festgestellt, die aber nicht signifikant für den gesamten Stickstoffverlust sind (NEETESON et al., 2001). Im Fall einer 90%igen Sättigung der Bodenporen mit Wasser und relativ hohem Anteil organischer Masse können potentielle Denitrifikationsverluste verstärkt werden (LINN und DORAN, 1984 in: VOOGT, 1999). In Westeuropa findet der Stickstoffablauf in den Wasserzonen des Bodens hauptsächlich vom späten Herbst bis Anfang Frühling statt. In dieser Zeit übertreffen die Niederschlagsmengen die herrschenden Evapotranspirationen (NEETESON et al., 2001).

Die maximal erlaubte Konzentration der  $\text{NO}_3^-$ -Ionen pro Liter Trinkwasser wird von der Europäischen Union auf 50 mg (= 11,3 mg N/l) festgelegt (Nitrat Richtlinie 91/676 EEC, Kommission der Europäischen Gesellschaft 1991). Messungen werden durchgeführt, um entweder die Grenzen der maximalen Dosierung festzusetzen oder auch um detaillierte Angaben über die Zeit, den Ort und die Art der Stickstoffapplikation zu geben (TITUALER, 1999; NEETESON et al., 2001; TEN BERGE et al., 2002). In den Niederlanden wird der Einsatz von Stickstoff in der Gemüseproduktion durch staatliche Regulierungen eingeschränkt. Der Anbau auf Substraten soll nach dem geschlossenen Verfahren durchgeführt werden, wobei der Bodenanbau für einige Kulturen erlaubt ist. Dennoch sollte die Nährstoffaus-

waschung eingeschränkt und das Wasser effizienter eingesetzt werden (GIELING, 2001). Die Zugabemenge wird anhand eines Mineralerklärungs-systems (MINAS) bestimmt (Tab. 2). Die erlaubte Stickstoffzugabemenge wurde für das Jahr 2000 auf 150 kg N/ha festgesetzt. Es wird beabsichtigt, diese Menge bis zum Jahr 2008 auf 100 kg N/ha einzuschränken (TITUALER, 1999).

Tab. 2: Die erlaubten Zugaberaten (kg/ha) für Stickstoff und Phosphat in Anlehnung des MINAS für Gemüseproduzenten (TITUALER, 1999)

<b>Jahr</b>	<b>1998</b>	<b>2000</b>	<b>2002</b>	<b>2005</b>	<b>2008</b>
<i>Stickstoff</i>	175	150	125	110	100
<i>Phosphat</i>	40	35	30	25	20

Die Einhaltung des  $N_{\min}$  im Boden unter 34 kg N/ha ist nach STEENVOORDEN (1983, 1988) eine sichere Maßnahme, um den Stickstoffgehalt des Wassers unter 50 kg/l zu halten (in: TITUALER, 1999). Dagegen wird diese Menge für die Winterperiode verdoppelt (GOOSESENSEN et al., 1990 in: NEETESON, 2001). Zur Bestimmung dieser Dosiermenge werden sowohl der Bodentyp, die Kultur und die Wasserqualität, wie auch Daten vergangener Düngerapplikationen, berücksichtigt. Durch neuartige Berechnungsmodelle werden die Stickstoffmengen in der Wurzelzone am Anfang der Kultivierungsperiode berechnet. Die Bewässerungssteuerung kann mit Hilfe geeigneter Transpirationsmodelle und parallel zur sensorgestützten Kontrolle der Boden- bzw. Substratfeuchte zur exakten Steuerung der eingesetzten Stickstoffmengen führen, ohne große Verluste durch überschüssige Wassermengen zu erzeugen.

### **1.3. Innovative Technologien und Kulturmethode-n der Gewächshaus-bewässerung**

#### **1.3.1. Bewässerungsverfahren und –systeme zur Wassermengenkontrolle**

Die sparsame Wasseranwendung im intensiven Pflanzenanbau spielte bis vor wenigen Jahren eine untergeordnete Rolle. Die Notwendigkeit für neue Technologien in der Wasserausbringung wurde jedoch sehr früh festgestellt. Innovative Bewässerungssysteme wurden zuerst im Freilandanbau und darauf folgend im Gewächshausanbau eingesetzt. Die einfache - aber unökonomische und zeitaufwendige - Wassergabe mit der Hand wird heute nur für Saatgutarbeiten angewendet.

Je nach Kulturmethode werden hauptsächlich drei Bewässerungsverfahren eingesetzt: die *Sprühbewässerung*, die *Tropfbewässerung* und das *Ebbe-Flut-System*. Eine führende Rolle hat das *Tropfsystem* übernommen. Die punktuelle Gabe von geringen Wassermengen verhindert die Befeuchtung der Pflanzen und der Bodenoberfläche. Diese Applikationsmethode ermöglicht eine wassersparende Nutzung von Flächen für den Pflanzenanbau. Im Vergleich zu konventionellen Systemen (Sprühbewässerung, Regner) kann eine Tröpfchenbewässerung zu signifikanten Ertragserhöhungen führen. Es wurden Ertragssteigerungen von 34 % bei Erdbeerkulturen nachgewiesen. Besonders in Perioden mit hoher Sonneneinstrahlung sind Ertragsunterschiede, bedingt durch verschiedene Bewässerungssysteme, festzustellen (TEKINEL et al., 1994).

Die Wasserverteilung durch Tropfer ist nicht problemlos. Die gleichmäßige Verteilung des Wassers während eines Gießvorganges ist abhängig von der Qualität der Tropfer, den Druckunterschieden und Druckschwankungen in den Leitungen sowie eventuell vorhandenem Nachtropfen (TEKINEL et al., 1994; HÖFERT et al., 1994; PASCHOLD et al., 1995; BECK et al., 1995). 2/3 der im Feld eingesetzten Mikrobewässerungssysteme zeigen bis zu 80 % Ungleichmäßigkeiten durch Druckvariationen und Verstopfungen (FERERES et al., 1997). Weitere Probleme, wie hohe Salzkonzentrationen an der Bodenoberfläche und im Bereich zwischen zwei nebeneinander liegenden Tropfern oder Wurzelwachstumseinschränkungen, sind im Einsatz dieser Bewässerungssysteme nicht zu übersehen. Daneben spielen die hohen Investitionskosten eine wichtige Rolle (TEKINEL et al., 1994). Zahlreiche Empfehlungen werden in wissenschaftlichen Untersuchungen gegeben, um die mit der Tröpfchenbewässerung verbundenen Probleme zu lösen (Tab. 3).

Tab. 3: Maßnahmen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Tropfsystemen (HÖFERT et al. 1994; PASCHOLD et al., 1995; BECK et al., 1995)

- 
- Auslaufventile am System anbauen und das Verteilsystem tiefer als das Rohrsystem stellen, um den Auslauf der Leitung zu verhindern. Selbstschließende Tropfer sind zu verwenden.
  - Die Qualität des Wassers überprüfen, um eventuelle Verstopfungen zu verhindern.
  - Die zugeführten Wassermengen der Speicherfähigkeit des Bodens oder Substrates anpassen.
  - Die Austrittsmenge je Zeiteinheit ermitteln, anstatt sie über den Druck einzustellen.
-

Durch die Entwicklung von druckkompensierenden Tropfsystemen soll die Abhängigkeit der Ausbringmenge vom Leitungsdruck entkoppelt werden (HÖFERT et al. 1994; PASCHOLD et al., 1995; BECK et al., 1995). Da jedoch verstärkt mikro-mechanische Bauteile in dem Tropfer eingesetzt werden, kann die für eine gleichmäßige Ausbringung erforderliche Fertigungstoleranz oft nicht eingehalten werden.

### **1.3.2. Hydroponische Kulturtechnologien in geschlossenen Kreisläufen**

Weltweit wird der Anbau in Erde noch heute von den Gartenbauproduzenten bevorzugt. Geringere Ansprüche an das gärtnerische Wissen, langjährige Erfahrungen und insbesondere niedrige Investitionskosten sind dafür ursächlich. Zusätzlich haben Aspekte der Verbraucherakzeptanz und die Hinwendung zu ökologisch produzierten Erzeugnissen eine wichtige Rolle in dem nach wie vor bestehenden Interesse an bodenkultivierten Nahrungsprodukten gespielt.

Die Erstellung von Wasserbilanzen bei Bodenkulturen ist schwierig, da die Bilanzanteile Bodenwasser und Versickerung schwer zu ermitteln sind. Je nach Art, Eigenschaften und Struktur (Porengröße) des Bodens unterscheiden sich diese Bilanzanteile. Entscheidenden Einfluss haben hier das Kultur- wie auch das Bewässerungssystem.

Als Alternative gewinnt die erdlose Kultivierung in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung. 1975 stieg in den Niederlanden der kommerzielle Anteil der erdlosen Kulturen auf Steinwolle an. 70 % des Gemüseanbaus und 24 % des Schnittblumenanbaus wurden 1993 in Steinwollsubstrat kultiviert (VERWER, 1976; SONNEVELD, 1988 in: GIELING, 2001). 1999 wurden 4.000 ha (Gemüse- und Schnittblumenanbau) als erdlose Kultursysteme angebaut. In Belgien werden ungefähr 800 ha als Substratkultur angebaut (VAN OS, 1999 in: GIELING, 2001). Ähnliche Entwicklungen sind auch in anderen Ländern zu beobachten. Die weltweit hydroponisch bewirtschaftete Fläche betrug 1994 ungefähr 20.000 ha (MAVROGIANNOPOULOS, 1994).

In der mediterranen Region ist der Einsatz von erdlosen Kulturverfahren wegen der eingeschränkten Möglichkeit der Klimasteuerung und der hohen Substrattemperaturen im Frühling und Sommer problematisch (BAILLE et al., 1994). Polyurethanmatten (PUR) sind in dieser Region von besonderem Interesse. Substrat-

kulturen, inklusive der NFT-Technik, expandieren langsam aber stetig. Die Tendenz führt zu einfachen Technologien und geschlossenen Systemen (mit einer Nährlösungsrezirkulation) (BAUDOIN, 1999).

Als Vorteile der hydroponischen Kultur können folgende Punkte genannt werden:

- bessere Wasser- und Sauerstoffbedingungen im Wurzelbereich der Pflanzen,
- Vermeidung bodenbürtiger Krankheiten,
- Verhinderung des Eintrittes von Pestiziden und Düngemittelresten im Grundwasser,
- bessere Anpassung der Automatisierung,
- Nutzung von Flächen, die für den Anbau nicht geeignet sind (salzhaltige Böden),
- Kosteneinsparungen durch die gezielte Versorgung der Pflanzen und die Einschränkung der Verluste und
- Erleichterung der Kulturarbeiten und Einsparung an Arbeitskosten.

Das niedrige Pufferungsvermögen der erdelosen Kultursysteme stellt, jedoch hohe Anforderungen an die Steuerung bzw. Regelung der Nährstoffversorgung. Die Wasserspeicherkapazität der Steinwollwürfel reicht nur für einige Tage, bei der NFT-Technik nur einige Stunden (KLÄRING, 2001). Das Konzept der Anreicherung der wichtigen mineralischen Elemente durch die Nährlösung ist einfach, aber seine effiziente Applikation kann schwierig werden, wenn kurzfristig kleine Nährmengen für rapide Wachstumsraten angefordert werden. Solche kleinen Systeme sind labiler als große und fordern rapide Reaktionen zu den Veränderungen der Nährlösung. Fehler in der Nährstoffversorgung wirken sich schneller auf den Kulturerfolg aus, als bei den Bodenkulturen.

### **1.3.2.a Offene und geschlossene Bewässerungsführung**

Eine erste Unterteilung der erdelosen Kulturverfahren kann nach dem Substrattyp erfolgen. Die Hydrokulturen werden auf inertem Substrat oder substratlos (Aeroponik) kultiviert. Weit verbreitet sind die Steinwollkulturen, die sowohl im Gemüse- als auch im Zierpflanzenanbau praktiziert werden. Auf dem Weltmarkt ist dieses Substrat mit dem Firmennamen „Grodan“ bekannt. Nach Angaben von SCHRÖDER (1994) bestanden 1994 um die 4.000 ha Gewächshausfläche weltweit aus Steinwollkulturen. Sehr stark ist auch das Perlitsubstrat vertreten. 48 % der gesamten Hydrokulturen (1.500 ha weltweit)



werden in Perlit angebaut. Umfangreiche Untersuchungen wurden für die Eignung als Substrat vorgenommen, indem Materialien wie Sand, Zeolith oder Blähton geprüft wurden (MALOUPA et al., 1993; MEINKEN et al., 1996; SCHNITZLER et al., 1996).

Bei den erdelosen Systemen besteht die Möglichkeit, durch einfache Methoden das überschüssige Wasser jedes Bewässerungsganges zu ermitteln. Meistens werden diese Wassermengen durch am Kultursystem angebaute Rinnen in ein Sammelbecken geführt. Die Entscheidung, diese Mengen zurück ins Bewässerungssystem zu führen oder sie zu entsorgen, charakterisiert das Kultursystem als *geschlossenes* oder *offenes* System. Bei einigen Systemen wird die Bewässerung ohne Überschusswasser durchgeführt.

Die *offene* Führung eines Kultursystems ist einfacher in der Anwendung und braucht weniger Fachkenntnisse als die geschlossene. Der technische Aufbau solcher Systeme ist unkompliziert und kostengünstig, da sie keine Rückführungssysteme und wenig Sensorik benötigen. Die Mengen des Überschusswassers können kontrolliert werden. Unter niedrigen Einstrahlungsbedingungen gehen 10-15 % an Wassermenge verloren, wobei bei höheren Einstrahlungsbedingungen diese Verluste zwischen 30-50 % liegen (DORAIS et al., 2001). Obwohl jedes erdelose System von einem Steuerungssystem geführt wird, sind Nährstoffverluste auch in diesem Fall nicht zu umgehen. Die Bewässerung einer Kultur auf Mineralwolle mit 28,4 % Sickerwasser pro ha Gewächshausfläche ergab Verluste von 660 kg N, 33 kg P, 550 kg Mg und 900 kg Ca (VOGEL et al., 1991). 2.800 m<sup>3</sup> Wasser, 2,5 t Salz und 1.700 kg Nitrate/ha pro Jahr entgehen bei der offenen Führung einer Tomatenkultur auf Steinwollkultur (MORARD, 1995 in: MORARD, 1996).

*Geschlossene* Kultursysteme zeigen eine bessere Öko- und Kostenbilanz als die offenen. Studien zeigen eine Verbesserung der Ökonomie des Wassers bis zu 30 % und der Düngemittel bis zu 40 % - verglichen mit den traditionellen offenen Systemen. Eine 100%ige effiziente Nutzung des Wassers und der Nährstoffe kann aufgrund der relativ schlechten Qualität des Bewässerungswassers nicht erreicht werden (BÖHME, 1996; VAN OS, 1999; TUZEL et al., 2001).

Vergleichsuntersuchungen zwischen einer geschlossenen und einer offenen Bewässerungsführung an Gurkenpflanzen in unterschiedlichen Substraten ergaben keine signifikanten Unterschiede im Pflanzenwachstum, Ertrag und in der Fruchtqualität (BÖHME, 1996; GÜL et al., 1999). Dagegen ergab ein geschlossenes Sy-

stem bei Gurken bessere Pflanzenhöhe, Frischgewicht und Trockengewicht, wie auch ein leicht verbessertes Fruchtgewicht der marktfähigen Produkte (CHOI et al., 2001).

Die Wiederverwendung des Überschusswassers für die Bewässerung ist mit einem Aufwand von technologischen Anforderungen verbunden, die fachliche Kenntnisse und höhere Investitionen im Bereich MSR voraussetzt. Eine Nährstoffbevorratung ist daher kaum möglich, Düngefehler werden schnell ertragswirksam (SCHACHT et al., 1994). Nicht zu vermeiden ist die Gefahr einer schnellen Verbreitung von Pflanzenpathogenen (VAN OS, 1999). Obwohl in diesen Systemen zuverlässig verhindert wird, dass Düngemittel ins Grundwasser gelangen, entweichen 20-40 % des angebotenen Stickstoffs gasförmig. Nach ZERCHE (1996) beeinflusst der Kulturzeitraum die Höhe der Verluste erheblich (59 kg/ha einer Januar- und 142 kg/ha einer Juli-Kultur).

Simulationsstudien an unterschiedlichen Kulturgruppen wurden durchgeführt, um ökonomische, technische und ökologische Aspekte der geschlossenen Kultursysteme zu untersuchen. Nach diesen Angaben braucht jede Kulturgruppe ein Kultursystem mit pflanzenspezifischen Eigenschaften. Die Studien zeigten auch, dass solche Systeme nicht für alle Kulturen einen ökonomisch sinnvollen Einsatz bedeuten (RUIJ et al., 1992; VAN OS et al., 1991; RUIJ, 1994 in: GIELING, 2001). In geschlossenen Verfahren wird die Dynamik des Bewässerungssystems vom Typ des Verfahrens und des Substrates beeinflusst (DORAIS et al., 2001).

Neben den Kulturverfahren sind das Dünnschichtkultursystem und das Containersystem ohne Überschusswasser zu unterscheiden. Voraussetzung ist ein gut pufferndes Substrat, um Salzakkumulationen im Substrat zu verhindern. Dennoch besteht die Gefahr, durch zu geringe Wasserüberschussmengen, die Pflanze ungenügend mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen. So entsteht die Notwendigkeit einer genauen Regelung, die sich am Wasserverbrauch der Kultur orientiert.

### **1.3.2.b Produktivität und Qualitätserhaltung**

Erdelose Kultursysteme haben erhebliche ertragsbezogene Vorteile gegenüber den Bodenkulturen. Die Kultivierung von Gemüse und Früchten in Perlit ergab einen Ertrag von 11 bis 12 kg/m<sup>3</sup> im Vergleich zu dem Ertrag von bodenkultivierten Pflanzen, der zwischen 3,5 bis 5 kg/m<sup>3</sup> lag (SANCHEZ, 1993; JOSE et al., 1994; JIME-

NEZ, 1993 in: GRILLAS et al., 2001). Gleiche Ergebnisse wurden bei Tomaten-Paprika- und Auberginenkulturen im Vergleich zwischen Steinwoll- und Bodensystemen festgestellt. Unterschiede zeigten sich auch in der Qualität der Früchte mit einem höheren Nitratgehalt bei der Bodenkulturvariante (OSVALD et al., 1996).

Durch ein zunehmendes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein der Verbraucher wurde in den letzten Jahren die angeblich unnatürliche Produktionsweise moniert, weil sie zu einer schlechten inneren Qualität der Produkte führe. Es gab Zweifel an der Erhaltung des natürlichen Geschmacks aufgrund von hydroponischen Produktionsbedingungen. Schon frühere Untersuchungen hatten jedoch gezeigt, dass die wesentlichen Qualitätsmerkmale von Gewächshausgurken in Kies oder Container sich nicht deutlich von den bodenkultivierten Gurken unterschieden (GEISLER et al., 1954 in: VOGEL et al., 1991). Der Inhaltsstoffgehalt von Tomaten unterscheidet sich zwischen den PPH-, NFT- und Bodenverfahren, jedoch ohne eine wahrnehmbare Beeinflussung des Geschmacks (AUERSWALD et al., 1996). Die Parameter der inneren Qualität der Tomaten (Vitamin C) sind abhängig von der Sorte, den Klimabedingungen, der Produktionsweise (Freiland oder Gewächshaus), der Erntezeit und der Zusammensetzung der Nährlösung. Befragungen bei Konsumenten zeigten, dass sie sogar erdelos kultivierte Tomaten bevorzugten (GYSI et al., 1996).

Aus ökonomischer Sicht sind die gesamten Ausgaben eines bodenkultivierten Tomatenbestands erheblich niedriger, als im Vergleich zu einer Tomatenkultur in Containern mit einer Perlit/Torf-Mischung. Die Ursachen für diese Kostendifferenz sind die höheren Ausgaben der Pflanzung und der Ernte (61 % der gesamten Kosten in erdelosen Kulturen und 43% in Bodenkulturen) (DUPLANCIC et al., 1996). Ein wesentlicher Aspekt, der für die Nutzung von hydroponischen Systemen spricht, ist die Gesetzgebung der Länder in Bezug auf den Umwelt- und Trinkwasserschutz.

#### **1.4. Wassernutzungseffizienz in Produktionsprozessen**

Zur Quantifizierung des effizienten Wassereinsatzes in der Agrarwirtschaft wird seit mehreren Jahren die „Wassernutzungseffizienz“ (Water Use Efficiency, WUE) verwendet. Die Definition und Berechnung dieser wird in der Literatur unterschiedlich vorgenommen. Aus pflanzenphysiologischer Sicht wird der transpiratorische Wasserverbrauch ( $\text{mmol/m}^2\text{s}$ ) zur Stoffproduktion (Nettophotosynthese in  $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ ) ins Verhältnis gesetzt (LARCHER, 1994):

$$WUE_{Ph} = Ph / Tr \quad (1)$$

Dieses Verhältnis wird als Wassernutzungskoeffizient der Photosynthese (LARCHER, 1994) oder Transpirationseffizienz - ITE oder  $W_t$  - (EAMUS, 1991; RICHARDS et al., 1993; HSIAO et al., 2000) bezeichnet und drückt das momentane Gaswechselverhalten eines Blattes oder der Pflanzendecke aus. Für die ökonomische und ökologische Bewertung der effizienten Wassernutzung wird einerseits die Trockensubstanzproduktion (WUE der Produktivität,  $WUE_P$ ) (LARCHER, 1994) bzw. das Gewicht der Trockenmasse (EAMUS, 1991) und andererseits der Ertrag (DINAR, 1993; LOVEYS et al., 2000; BOARI et al., 2000; CANDIDO et al., 2000) der gesamten Kulturperiode zum gesamten Wasserverbrauch, ins Verhältnis gesetzt:

$$WUE_P = \text{organische Trockensubstanzproduktion} / \text{Wasserverbrauch} \quad (2)$$

$$WUE_E = \text{Ertrag} / \text{Wasserverbrauch} \quad (3)$$

Nach RICHARDS et al. (1993) definieren die Farmer in den USA als WUE den Ertrag oder den ökonomischen Gewinn pro Wassereinheit durch Niederschlag oder Bewässerungsvorgang. Im Zähler kann dabei das Gewicht der Körner, der Früchte oder die über den Boden befindliche Biomasse - oder die gesamte Biomasse - stehen. Der Bedarf, d.h. die durch Bewässerung und Evapotranspiration umgesetzte Wassermengen, werden typischerweise im Nenner eingesetzt.

Die unterschiedlichen Definitionen des WUE führen nach Angaben von LETEY (1993) zu gegensätzlichen Ergebnissen. Ertragserhöhungen pro Einheit der ET kann in den meisten Fällen durch Maximierung der ET erreicht werden. Die Zugabe größerer Wasserbeträge erhöht die Evapotranspiration und somit die Ertragsmenge. Dagegen wird der  $WUE_E$ , als Ertrag pro Einheit zugeführter Wassermenge, durch Einschränkung der zugeführten Wassermengen erhöht. Im ersten Fall wird angenommen, dass das von der ET nicht verlorene Wasser in anderen Prozessen verbraucht wird, wobei im zweiten Fall das überschüssige Wasser nicht weiter genutzt wird.

### 1.4.1. Integration des WUE

Die WUE-Werte der verschiedenen Kulturen an einem definierten Standort variieren sowohl im Tages- wie auch im Jahresverlauf sehr stark. Im Tagesverlauf wird der momentane WUE- Wert durch den Wasserdampfgehalt zwischen Blatt und umge-bender Luft und durch die photosynthetisch aktive Strahlung geprägt. Saisonale Va-riationen im Laufe der Jahre sind mit der ontogenetischen Entwicklung der je-weiligen Kultur (Blütezeit, Fruchtentwicklung) und der saisonalen Variation des Klimas verbunden (LARCHER, 1994).

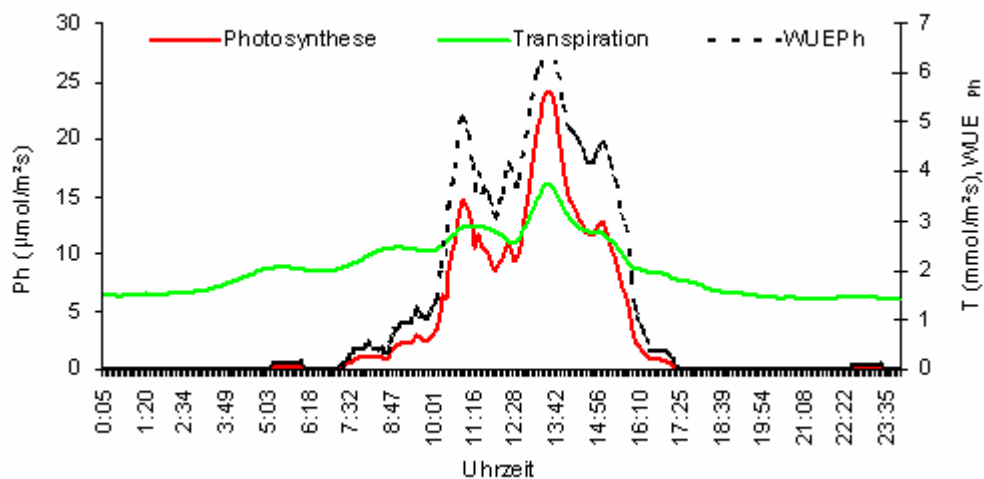


Abb. 2: Tagesverlauf des momentanen  $WUE_{ph}$ , der Nettophotosynthese und der Transpiration bei *Cucumis sativus*

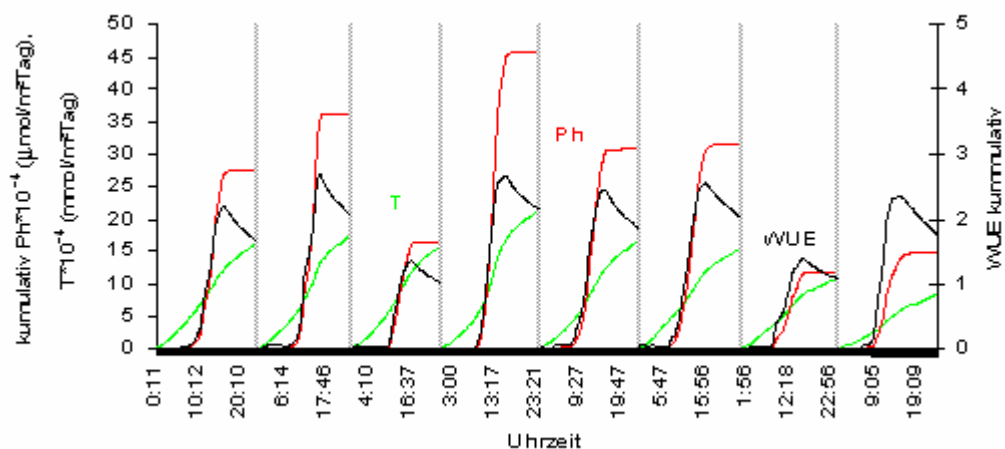


Abb. 3: Kumulativer Tagesverlauf des  $WUE_{ph}$ , der Photosynthese (Ph) und der Transpiration (T) in einer achttägigen Zeitperiode bei *Cucumis sativus*

Veränderungen der Diffusionsbedingungen für Wasserdampf und  $\text{CO}_2$  bestimmen den momentanen Wassernutzungskoeffizienten der Photosynthese  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  (Abb. 2). Aus den momentanen Messungen der Gase kann der  $\text{WUE}_{\text{Ph}}$  für Langzeitperioden bestimmt werden. Langzeitmessungen des momentanen Gaswechselverhaltens am Pflanzenblatt ermöglichen Aussagen über den Wasserzustand der Pflanze (Abb. 3, 4).

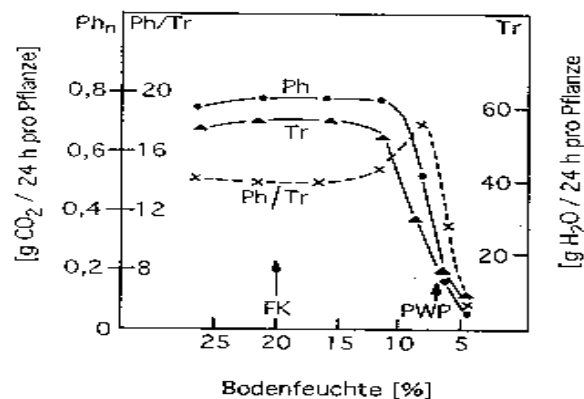


Abb. 4: Photosynthetische Wassernutzung bei Wassermangel: Tagessummen der Nettophotosynthese (Ph) und der Transpiration (Tr) und der Quotient Ph/Tr von 6 Wochen alten Weizenpflanzen bei Bodenaustrocknung (AHO et al., 1979 in: LARCHER, 1994)

Bei ausreichender Wasserversorgung über mehrere Wochen bleibt das Verhältnis Ph/Tr relativ stabil. Wenn beide Gasströme etwas reduziert sind (Mangelbeginn), ist deren Verhältnis am höchsten. Bei fast geschlossenen Stomata (Wassermangel) nimmt das Verhältnis steil ab (Abb. 4).

Der WUE ist eine integrierende Größe, in die alle Eigenschaften der Trockenstressvermeidung und der -toleranz eingehen und ebenso alle Stoffwechselbesonderheiten, welche die Biomasseerhöhung (LÖSCH, 2001) sowie auch die Produktionsleistung, fördern. Die oben genannten Eigenschaften des WUE ermöglichen, Pflanzen mit hohem WUE in wasserlimitierenden Bedingungen anzubauen und somit ein besseres Ertrag/Wasser-Verhältnis zu erreichen. In der Gewächshausproduktion sollte der WUE besonders beachtet werden, weil er Aussagen über Effekte von Einstrahlung, Transpiration und Photosynthese, wie auch deren Wechselwirkungen, auf das Pflanzenwachstum ermöglicht (JOILLET, 1993).

Der wissenschaftliche Ansatz in der Phänologie einiger Kulturen durch genetische Veränderungen führt zu Ertragserhöhungen ohne zusätzliche Wassergabe und somit zu einer positiven Veränderung des  $\text{WUE}_E$ . Die vegetativen und produk-

tiven Zeitperioden der Kulturen werden den verfügbaren Wasser- und Klimakonditionen angepasst, um limitierenden Konditionen auszuweichen. Auch die durch genetische Veränderungen frühzeitige Reife der Früchte beeinflusst positiv den  $WUE_E$ , da unabhängig von den Erntekonditionen mehrere Kulturen im Jahr geerntet werden können. Nach RICHARDS (1991), wird durch die Einschränkung der Pflanzenhöhe und der Zeitspanne zwischen Aussaat und Blüte ein größerer Teil des Photosyntheseproduktes für die Fruchtentwicklung eingesetzt. Methoden, wie die Reduzierung der Wurzelmasse, die Einschränkung der Respiration in der Nacht oder die Biomasseerhöhung in den kältesten und feuchtesten Perioden erhöhen den  $WUE_{Ph}$ . Die Entwicklung einer größeren Pflanzendecke reduziert einerseits die Wasserverluste durch die Evaporation und fördert andererseits die Transpiration (in: RICHARDS et al. 1993). Unter hohen  $CO_2$ -Luftkonzentrationen ist der Prozess der Nettophotosynthese stärker als der der Transpiration. Ein niedriges VPD erhöht zusätzlich den WUE (EAMUS, 1991; ZABRI et al., 1998; CLIFFORD et al., 2000). Eine durch die Bewässerung geführte  $CO_2$ -Applikation bei Melonenpflanzen führte zu hohen WUE (PINTO et al., 2000).

Der WUE der Blattfläche steigt mit der Zunahme des verfügbaren Lichtniveaus. Innovative Veränderungen im Kultursystem und im Pflanzenabstand bei Aprikose- und Kiwikulturen führten zu größeren LAI-Werten und zur Erhöhung der Trockenmasseproduktion. Im Vergleich zu schattierten Blättern sind die WUE-Werte der dem Licht ausgesetzten Blätter 6 bis 20mal höher (XILOYIANNIS et al., 2000).

Sowohl im Feldanbau wie auch in der Gewächshausproduktion dient die technologische Entwicklung neuer Bewässerungssysteme der effektiven Kontrolle der eingesetzten Wassermengen. Der WUE eines doppelbedeckten Tunnel-Gewächshauses zeigte einen höheren Wert als eines mit einfacher Bedeckung (TEKINEL et al., 1994).

Bei einer regionalen Langzeitstudie zur Bewässerung von Citruskulturen variierten die zugeführten Wassermengen signifikant, wenn die Wasserzufuhr durch Tropfsysteme, Düsensysteme und Furchensysteme erfolgte (8128, 8890 und 9906 m<sup>3</sup>/ha entsprechend). Der Übergang von der Furchenbewässerung zur Tröpfchenbewässerung brachte eine 18%ige Einsparung des zugeführten Wassers und eine Reduzierung des Drainagewassers (DINAR, 1993). LOVEYS et al. (2000) haben ein Bewässerungssystem für Weinkulturen entwickelt, dass die vegetative Entwicklung der Kultur einschränkt und den WUE verbessert. Mit der so genannten PRD-Technik

wird nur ein Teil der Wurzel bewässert, so dass sich Abscisinsäure (ABA) im trockenen Teil der Wurzel bildet. Dadurch wird der Öffnungsgrad der Stomata reduziert, was die Wasserverluste (Transpiration) und die Photosyntheseleistung einschränkt. Der WUE der Kontrollvariante (voll bewässert) lag bei 6,4 t/ML und der der PRD-Variante bei 11,9 t/ML.

Weitere mögliche Effekte der technologischen Entwicklung, wie die Begrenzung der Umweltbelastung, haben besonders im Feldniveau einen positiven Einfluss auf die effiziente Wassernutzung (MEYER, 1990; DINAR et al., 1991 in: DINAR, 1993).

Nicht nur die Quantität, auch die Qualität des Wassers ist zu berücksichtigen. Angaben von HANKS et al. (1977) und STEWART et al. (1977) zeigen, dass das Verhältnis zwischen Ertrag und ET identisch ist bei einer ET-Einschränkung - wegen hoher Salzkonzentration des Wassers oder wegen limitierter Wasserverfügbarkeit (in: LETEY, 1993).

Der  $WUE_T$ -Wert, als Verhältnis der Transpiration zu den zugeführten Wassermengen, liegt in Israel bei 0,9 (STANHILL, 1991 in: DINAR, 1993). Trotz der bekannten Wasserknappheit ist dieser Wert in anderen Regionen viel niedriger. Obwohl durch die Wissenschaft die potentiellen WUE-Werte erhöht wurden, erreichen in der Praxis die aktuellen WUE-Werte nicht immer dieses hohe Niveau, da die Anbauer unter anderen wirtschaftlichen und ökologischen Konditionen praktizieren (DINAR, 1993).

#### **1.4.2. Auswirkung der Wasserbilanzüberschüsse**

Unter Gewächshausbedingungen können die unproduktiven, überschüssigen Wassermengen präziser gemessen und besser kontrolliert werden. Der Einsatz neuer Kultur- und Bewässerungsverfahren (Ebbe-Flut-System, Container und Tischkulturen) erlauben eine einfache und unkomplizierte Messung der Sickerwassermenge.

Die Überschussbewässerung kann zu physiologischen Funktionsstörungen führen, die indirekt die Fruchtqualität beeinflussen. Epinastie, Verringerung der Triebverlängerung, vorzeitige Alterung der Blätter, hohe Konzentrationen von Abszissinsäure und eine mangelhafte Wurzelgesundheit können ebenso eine mindere Fruchtqualität verursachen (BASIOUNY et al., 1994). Reduktion der löslichen Zucker, Vitamine, Mineralien usw., oder auch die Tendenz der Früchte aufzuplatzen (ABBOT et al, 1985 und 1986; PEET, 1992; McAVOY, 1995; PEET et



---

al., 1995), sind weitere Resultate einer erhöhten Wassergabe. Auch ein entstehender Wassermangel in entscheidenden Kulturperioden kann die Qualität der Früchte beeinflussen. Abnahme des Fruchtwassergehalts und Zunahme der löslichen Farbstoffe, der Sucrosen/Saccharosen, der Hexosen, der Zitronensäure und des Kaliums in der Frucht wurden festgestellt (ADAMS, 1990; MITCHELL et al., 1991; PULUPOL et al., 1996).

Wie in der Praxis wird für die Berechnung des WUE auch in den wissenschaftlichen Arbeiten diese verlorene - und somit ineffiziente Wassermenge - nicht berücksichtigt. Die Berechnung der Verbrauchsmenge, durch Versickerung und Transpiration, zu der gesamten Wasserzugabemenge wird hiermit als Koeffizient der Wasserbilanz  $K_B$  bezeichnet:

$$K_B = \text{Versickerung} + \text{Transpiration} / \text{Wasserzugabemenge} \quad (4)$$

Durch die Kenntnis des  $K_B$  jener spezifischen Kultur (unter bestimmten klimatischen Bedingungen) könnte die Bewässerung besser kontrolliert werden. Niedrige  $K_B$  verweisen auf hohe Überschusswassermengen oder/und eingeschränkte Transpiration der Pflanzen. Durch eine exakte Bewässerungssteuerung können die Versickerungsmengen vermindert werden. Andererseits ist es möglich, durch die Klimasteuerung im Gewächshaus, eine höhere Transpirationsleistung der Pflanzen zu erreichen.

## 2. DER WASSERSTROM IM SPAC-SYSTEM

Die Quantifizierung der im SPAC-System existierenden Wassermengen erfolgt durch die Bestimmung des Wasserpotenzials jeder Teilkomponenten des Systems (Boden, Pflanze, Atmosphäre). Das Wasser wird im wässrigen System der Pflanze und im Boden osmotisch gebunden. Um dieses Wasser zur Verfügung zu stellen, müssen Energiemengen aufgewandt werden. Wird das Wasser in einer Pflanzenstelle oder im Boden unter Druck gesetzt, entsteht das Druckpotenzial  $\Psi$ . Wenn zwei Stellen ungleiches Wasserpotenzial haben, entsteht zwischen beiden eine Wasserpotenzialdifferenz  $\Delta\Psi$ . Diese Differenz wird ausgeglichen, wenn sich das Wasser von der Stelle des niedrigen Wasserpotenzials zu der des höheren bewegt. Ein negatives Wasserpotenzial weist auf eingeschränkte Wasserverfügbarkeit hin. Das Wasserpotenzial wird in Energieeinheiten (J/kg) oder Druckgrößen (Pa) angegeben.

### 2.1. Wasserbewegung im Boden – Wasseraufnahme der Wurzel

Das Wasser bewegt sich im Boden - entsprechend des allgemeinen Triebkraftgesetzes - bis an allen Stellen des Bodens das Gesamtpotenzial den gleichen Wert aufweist. Das Gesamtpotenzial im Boden  $\Psi_B$  ist die Summe aus verschiedenen Potenzialen:

$$\Psi_B = \Psi_m + \Psi_\pi + \Psi_p + \Psi_g \quad (5)$$

Die entscheidende Wasserpotenzialkomponente ist das Matrixpotenzial  $\Psi_m$ . Das Matrixpotenzial entsteht aus der Attraktion der Bodenmatrix für Wasser und der Attraktion der Wassermoleküle untereinander. Es ist ein Betrag nutzbarer Arbeit/Volumenanteil erforderlich, um eine bestimmte Wassermenge reversibel und isotherm von einer freien Wasserfläche in gebundenes Wasser zu überführen. Das Matrixpotenzial wird auch als *Wasserspannung* bezeichnet. Wenn infolge unterschiedlicher Wassergehalte sich das Matrixpotenzial des Bodens ändert, variiert auch die Transmissionsfähigkeit des Bodens für Wärme, Elektrizität und Wasser und der Reflexionsgrad für elektromagnetische Strahlung.

Die aus der Pflanze aufgenommene Wassermenge hängt von der Größe der effektiven Wurzelfläche, der Potenzialdifferenz zwischen Boden und Wurzel und der Transferwiderstände des Wassers im Boden und beim Übergang vom Boden in die Pflanze, ab. Die Entfernung von Wassermengen aus der Wurzelumgebung setzt einen Wasserfluss aus feuchteren Bereichen des Bodens in Gang, der vom Nachleitwiderstand ( $r_{BW}$ ) des Bodens beeinflusst wird. Das Wasser bewegt sich nach den entstehenden Potenzialgefällen vom Boden zu den Wurzelhaaren und zur Wurzelrinde, sowie über den Passagen der Exodermis und Endodermis, zum Wurzelxylem. Dabei entstehen Transport- und Leitwiderstände.

Der Wassereintritt vom Boden in die Pflanzenwurzel erfolgt bei gering transpirierenden Pflanzen osmotisch (nur in Salzböden). Durch Anreicherung von osmotisch wirksamen Stoffen in den Wurzeln baut sich ein stark negatives Wasserpotenzial zwischen Boden und Wurzel auf. Diese osmotisch bedingte Wasseraufnahme wird als ein *aktiver Stoffwechselprozess* der Pflanze betrachtet. Bei stark transpirierenden Pflanzen ist der *passive Stoffwechselprozess* intensiver als die osmotische Wasseraufnahme. Die hohe Massenflussintensität verdünnt den Xylemsaft in den Wurzeln. So entsteht ein niedriges osmotisches Potenzial in den Wurzeln. Das Druckpotenzial, welches die Wurzel entwickelt ist sehr niedrig, aber ausreichend, um aus den meisten Böden den größten Teil des Haftwassers aufzunehmen. Ein Potenzialabfall von nur  $-0,2$  MPa reicht der Wurzel aus, um mehr als  $2/3$  des in einem Sandboden gespeicherten Wassers zu entnehmen (LARCHER, 1994).

Für die Pflanzen ist ein großes Wasserspeichervermögen des Bodens (Substrates) von Vorteil, da die Wassermangelperioden besser überbrückt werden können. Wenn eine Pflanze kein Bodenwasser mehr zur Verfügung hat, erreicht sie einen Punkt, an dem sie das durch die Transpiration abgegebene Wasser aus dem Boden nicht mehr ersetzen kann und welkt. Wenn die Turgeszens der Pflanze nach einer Wasserzufuhr nicht mehr wiederkehrt, bleibt im Boden noch Wasser übrig. Dieser Wasseranteil wird als *permanenter Welkepunkt (PWP)* bezeichnet. Für die Mehrheit der Kulturpflanzen entspricht der PWP einem Wert von ungefähr  $-1,5$  MPa (SCHEFFER et al., 1998), der dem pflanzlichen Wasserpotenzial am Turgor-Nullpunkt entspricht (LÖSCH, 2001). Letztendlich liegt das für die Pflanze verfügbare Wasser im Bereich zwischen Feldkapazität und permanenten Welkepunkt. Das *pflanzenverfügbare Bodenwasser* sinkt überproportional mit abnehmendem Wassergehalt bzw. Wasserpotenzial des Bodens (Abb. 5). Weitere wichtige Charakteristika

des Bodens sind die *Wasserspannungskurven* oder *pF-Kurven*, die die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt als eine Summenkurve der Wasseranteile, bei zunehmendem Wasserpotenzial, darstellen. Der maximale Wassergehalt wird erreicht, wenn der gesamte Porenanteil mit Wasser gefüllt ist (BECK, 2000). Das pflanzenverfügbare Wasser des Bodens ist also nicht so sehr von der absoluten Wassermenge des Bodenwassers abhängig, sondern vom energetischen Aufwand für das Auslösen des Wassers aus der Bodenmatrix.

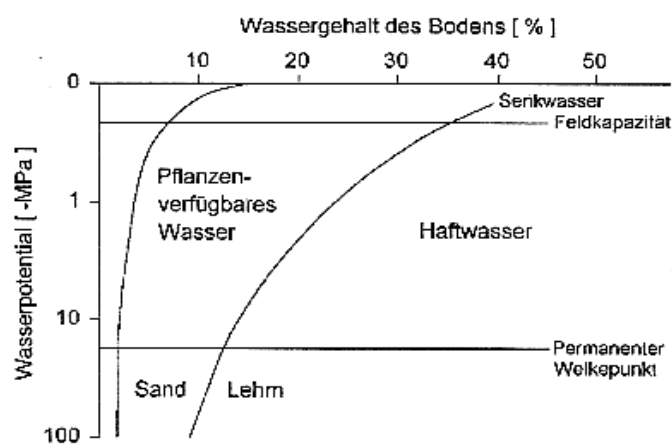


Abb. 5: Abhängigkeit des Wasserpotenzials eines Sand- und Lehmbodens vom Wassergehalt des Bodens (LÖSCH, 2001)

Wenn keine Wasserpotenzialdifferenz zwischen Boden und Pflanze mehr existiert (typisch für die Morgendämmerung), herrscht in der Pflanze das „predawn“ Wasserpotenzial, welches die generelle Wasserversorgungssituation des Standortes charakterisiert.

## 2.2. Wasserfluss in der Pflanze

Das Gesamtwasserpotenzial  $\Psi_W$  einer Pflanzenzelle ergibt sich aus der folgenden Wasserpotenzialgleichung:

$$(-) \Psi_W = (-) \Psi_{\pi} + (+) \Psi_P \quad (6)$$

Bei negativem Wasserpotenzial  $\Psi_W$  einer Pflanzenzelle, im Vergleich zu ihrer

Umgebung, erfolgt ein Wassereinstrom aus der Umgebung in die Zelle. Dieser Wassertransport erfolgt so lange, bis das Druckpotenzial (elastischer Gegendruck der Zellwand) das osmotische Potenzial kompensiert. Ist die Zelle mit Wasser gesättigt, so erreicht der Protoplast sein größtes Volumen und übt auf die Zellwand den stärksten Druck aus (Turgor), mit dem Ergebnis, dass  $\Psi_w = 0$  ist. Der Turgordruck erreicht Werte bis zu 0,7 MPa. Die Abhängigkeit des Wasserpotenzials einer Zelle von ihrem Wassergehalt wird im „HÖFLER-Diagramm“ dargestellt. Das osmotische Potenzial der Zelle wird negativer, je mehr Wasser ihr entzogen wird. Das Druckpotenzial  $\Psi_p$  nimmt stark exponential ab (Abb. 6).

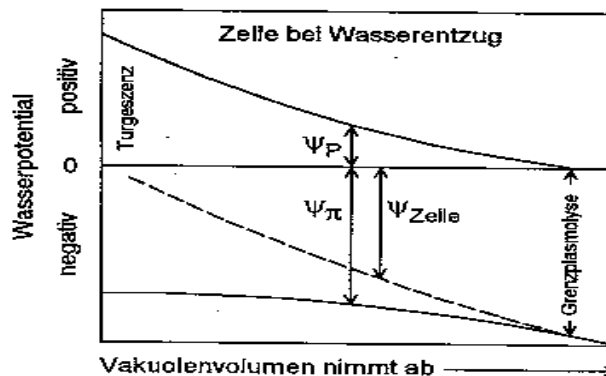


Abb. 6: HÖFLER-Diagramm: Osmotischer Zustand und Wassergehalt einer Pflanzenzelle (LÖSCH, 2001)

Die in den Pflanzenzellen bestehende Osmoregulation sorgt für die Stabilisierung des Turgor in Stresssituationen. Hohes Dampfdruckdefizit der Luft oder salzhaltiges Bodenwasser führen zum Wasserentzug aus der Zelle. In diesem Fall folgen eine Verkleinerung des Vakuolenvolumens und eine gleichzeitige Erhöhung der Saftkonzentration in der Zelle. Das Turgorpotenzial sinkt begrenzt und die Wasseraufnahme in das Gewebe wird aufrechterhalten. Erreicht trotzdem das Turgorpotenzial den Nullwert (Wasserstress auf Dauer), ist das Gesamtpotenzial  $\Psi_w$  gleich dem osmotischen Potenzial  $\Psi_\pi$ . Von der Außenfläche der Zellwand verdunstet Wasser, die zur Austrocknung und letztendlich zur Faltung der Wand und zur Welkung der Zelle führt.

Der Turgor einer Zelle ist entscheidend für die Ausdehnung der Zellwand und für die Wasseraufnahme in die Zelle. Verändert sich der Turgordruck, beginnt einerseits die Ausdehnung bzw. Einschrumpfung der Zellmembran und andererseits die Aufnahme bzw. Abgabe von Zellwasser. Der Turgor der Zellen reguliert das

Öffnungsverhalten der Stomata. Dadurch steht er im Mittelpunkt des Gaswechselverhaltens zwischen der Blattoberfläche und der Atmosphäre (LARCHER, 2000; LÖSCH, 2001).

Die herrschenden Potenzialgradienten im SPAC-System verursachen die Strömung des Wassers von der Wurzel - durch das Xylem - bis zu den Blättern der Pflanzen. Das Wasserpotenzial des Xylemsaftes liegt zwischen  $-0,1$  und, und im Extremfall,  $-6$  bis  $-7$  MPa. Die Anatomie des Xylem verursacht Unterschiede in der Saftstromleistung innerhalb des gleichen Xylems. Leistungsunterschiede im Saftstrom sind artspezifisch. Zur Quantifizierung des Saftstroms im Xylem wird die Wasserleitfähigkeit der Stängel und Sprosse beschrieben. Dazu dient die relative Leitfläche oder „Huber value“ und die hydraulische Leitfähigkeit des Xylems, die unabhängig von der Anatomie des Xylems berechnet werden kann (LÖSCH, 2001). Entlang der Achsen herrschen unterschiedliche Leitfähigkeiten und Wasserpotenzialdifferenzen, die unterschiedliche Saftstromgeschwindigkeiten verursachen. Das Wasser fließt vom Xylemsystem weiter zu den Blattadern und darüber hinaus ins Mesophyllgewebe und in die Epidermiszellen. Die Menge und Geschwindigkeit des Wasserdurchsatzes durch das Xylem folgt der Wasserabgaberate von den Blättern.

### **2.2.1. Transpirationsprozess im Wasserpotenzialgefälle**

Das pflanzliche Gewebe liegt mit einem niedrigen Wasserpotenzial (zwischen  $0$  und  $-6$  MPa, extreme Ausnahmewerte bis  $-10$  MPa; je nach standortspezifischer Trockenheitsbelastung) zwischen der steilen Wasserpotenzialdifferenz des Bodens (bis einige  $100$  kPa) und der Atmosphäre (von einigen bis mehreren  $100$  MPa). Weil die Verdunstungsflächen der Blätter dem Dampfdruckdefizit der Luft (niedriges Wasserpotenzial) ausgesetzt sind, wird das Wasser in der Pflanze bewegt. Die Pflanze wirkt als „Kurzschluss“, solange die Höhe des Wasserpotenzials in der Luft den Charakter einer Senke und die des Wasserpotenzials im Boden der einer Quelle hat (SCHEFFER et al., 1998).

Nach ROSENBERG et al. (1983) nimmt nur  $1\%$  des von der Pflanze aufgenommenen verfügbaren Wassers an metabolischen Aktivitäten teil. Der größte Anteil des aufgenommenen Wassers verdunstet in der Luft (YANG et al., 1990). Ein Teil des gebildeten Wasserdampfes verlässt die Pflanze durch die Kutikula. Nur  $10\%$  der Gesamttranspirationsmenge wird über die Kutikula ausgeschieden (*kutikuläre Transpiration*). Diese wird von den Eigenschaften der Blattoberfläche (morpho-

logische Struktur, Dicke der Wachsschicht) beeinflusst (RICHARDS et al. 1987 in: XU et al., 1995). Die Wasserverdunstung über die Spaltapparate ins Freie wird als *stomatäre Transpiration* bezeichnet. Diese hat einen Anteil von über 90 % an der Gesamttranspiration (JACOB et al., 1994). Die stomatär transpirierende Wassermenge wird durch den stomatären Leitwert ( $g_s$ ) beschrieben, der vom Wasserpotenzial des Gewebes bestimmt wird (RICHARDS et al. 1987 in: XU et al., 1995).

Wasser verlässt die Pflanze in der Form des Dampfes. Der Prozess der Phasenumwandlung, bei dem sensible in wärmelatente Energie umgewandelt wird, findet hauptsächlich an den Wänden der Interzellularen im Blatinnen statt, die grundsätzlich mit Wasserdampf gesättigt sind. Wasserdampfmengen diffundieren von den Interzellularen - über die Spaltapparate (Stomata) durch den Grenzschichtbereich (GS) - in die ungesättigte Umgebungsluft der Blätter hinaus. Dieser entgangene Wasserdampf wird nach der Gastheorie durch das Verhältnis vom Druck zur Konzentration bestimmt. Als Teil der Atmosphäre, welche die Wasserdampfmengen auffängt, erzeugt er einen Partialdampfdruck  $p_i$  zum atmosphärischen Luftdruck und eine Konzentration  $c_i$  zur Dichte des gesamten Gasgemisches der Umgebungsluft.

Das Sättigungsdefizit oder Dampfdruckdefizit der Luft ( $VPD_l$ ), definiert als die Differenz zwischen dem Sättigungspartialdampfdruck ( $p_s$ ) bei der vorherrschenden Lufttemperatur ( $t_l$ ) und dem aktuellem Partialdampfdruck ( $p_D$ ) der Luft, beschreibt die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf. Bei einer vorherrschenden Lufttemperatur ( $t_l$ ) und relativen Luftfeuchte ( $\phi$ ) wird das Sättigungsdefizit der Luft folgend berechnet:

$$VPD_l = p_s - p_D = p_s \cdot (1 - \phi/100) = e^* - e \quad (7)$$

In der Forschungsliteratur wird übereinstimmend das Sättigungsdefizit der Luft (CHOUDURY et al., 1986; STANGHELLINI, 1987; JOILLET et al., 1992; BOULARD et al., 1993; BAILLE et al., 1994; CASTELLVI et al., 1996) als die treibende Kraft des Transpirationsprozesses bezeichnet. Da aber im Gewächshaus die Blattgewebetemperatur sich häufig von der Lufttemperatur unterscheidet (wegen der Strahlungswärme oder Transpiration), ist diese Größe nicht ausreichend zur genauen Definition des Massentransports geeignet. Unter Berücksichtigung der Temperaturunterschiede zwischen Blatt und Luft wird der Massentransport durch die Wasser-

dampfdruckdifferenz ( $VP_{d_{l-b}}$ ) (vgl. Gl. 8) - Wasserdampfkonzentrationsdifferenz ( $VCD_{l-b}$ ) - beschrieben (SCHMIDT, 1989; KITANO et al. 1990; STANGHELLINI et al., 1995; HEIßNER, 1997). Da nach THORNLEY und JOHNSON (1990) an der Blattoberfläche bzw. in den Interzellularen 100 % Luftfeuchte herrscht, wird der Dampfdruck der Blattoberfläche aus dem Sättigungsdampfdruck ( $e^*(t_b)$ ) bei der vorherrschenden Blatttemperatur hergeleitet (in: BECK, 2000):

$$VP_{d_{l-b}} = p_{s_b} - p_s = e^*(t_b) - e \quad (8)$$

Die aus dem Diffusionsprozess entstehende Transpirationsmassenflussdichte bzw. -intensität ( $m_v$ ) ist direkt proportional zur Wasserdampfkonzentrationsdifferenz  $VCD_{l-b}$  zwischen der wasserdampfgesättigten Blattoberfläche und der freien wasserdampfgesättigten Umgebungsluft, und dem Blattflächenindex des Bestandes (SCHMIDT, 1989). Anhand des Diffusionsgesetzes kann diese Beziehung wie folgt beschrieben werden:

$$m_v = \sigma * VCD_{l-b} * LAI = \sigma * [x_s(t_b) - x(t_i)] * F_b/F_g \quad (9)$$

Der Koeffizient dieser Proportionalitätsbeziehung ist der „Transportkoeffizient“ dieser Strömung. Er ist verbunden mit physiologischen Parametern, wie der Stomaöffnungsgang und die internen Transportwiderstände im Blattinneren. Wenn die Sättigungsdampfdruckdifferenz ( $VP_{d_{l-b}}$ ) bzw. -konzentrationsdifferenz ( $VCD_{l-b}$ ) eine kritische Grenze überschreitet, fällt die Beziehung zur Transpiration in einen disproportionalen Bereich (Abb. 7)

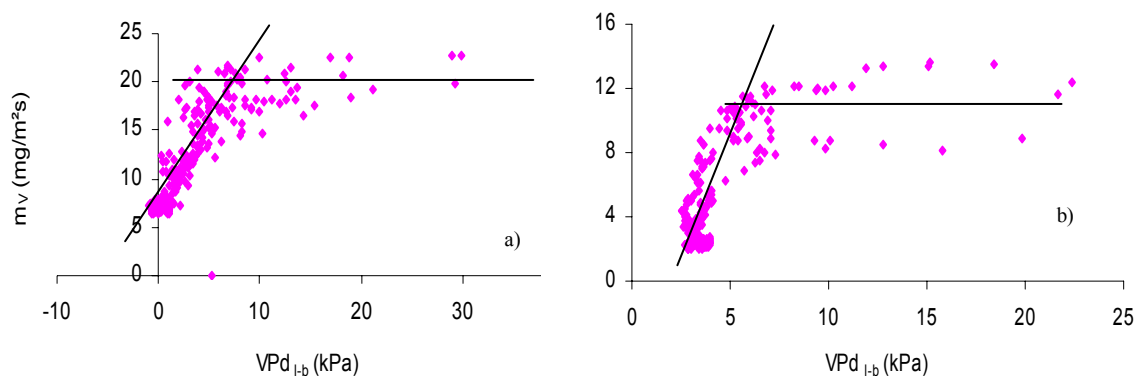


Abb. 7: Abhängigkeit des Transpirationsmassenflusses ( $m_v$ ) von der Sättigungsdampfdruckdifferenz ( $VCD_{l-b}$ ) bei a) *Capsicum annum* und b) *Lycopersicon esculentum*



In der Pflanze setzt sich der Widerstand beim Wasserdampftransport aus folgenden Transportwiderständen zusammen:

- Phasenwechselwiderstand beim Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase ( $r_{pw}$ );
- Widerstand des Transports des Wasserdampfs durch die interzellularen Hohlräume des Blattes ( $r_{lh}$ ). Er ist abhängig von der Dicke des Blattes, der Gestalt des Hohlraumes und dem Wasserpotenzial des Blattes;
- Stomatärer Widerstand ( $r_s$ ), als aktiver Regulator der Gewebetemperaturen, des Wasserhaushalts der Pflanze und des  $CO_2$ -Regelkreises (Photo-synthese); der stomatäre Widerstand ist abhängig von der Größe, den Bau, der Anordnung und der Dichte der Stomata der einzelnen Pflanzen;
- Kutikulärer Widerstand ( $r_k$ ), als die transpirationshemmende Wirkung der kutikulären Wachsschicht und
- Grenzschichtwiderstand ( $r_{l.b.}$ ), der in Verbindung mit der Luftschicht an der Blattoberfläche steht (Grenzschicht-GS). Je größer die Blattfläche und die Dichte der Blattbehaarung, desto größer der Grenzschichtwiderstand.

Die kutikulären und stomatären Widerstände werden oft als Blattwiderstand ( $r_b$ ) zusammengefasst. Als Blattleitfähigkeit ( $g_b$ ) wird der Reziprokwert des Blattwiderstands bezeichnet und der des stomatären Widerstands als stomatärer Leitwert ( $g_s$ ). Als  $r_c$  wird der Bestandwiderstand bezeichnet. Der aerodynamische Effekt auf dem Wärmetransport und der ET wird durch den aerodynamischen Widerstand ( $r_a$ ) dargestellt.

Die Messung oder Modellberechnung dieser Leitfähigkeits- und Widerstandswerte wird in umfangreichen, wissenschaftlichen Arbeiten dokumentiert und zur Ermittlung der Transpirationsrate verschiedener Kulturen eingesetzt (vgl. Kap. 3.2.2.). Mit Hilfe einer elektrischen Analogiebetrachtung kann der Wassertransport im SPAC-System als Schaltbild dargestellt werden (Abb.8).

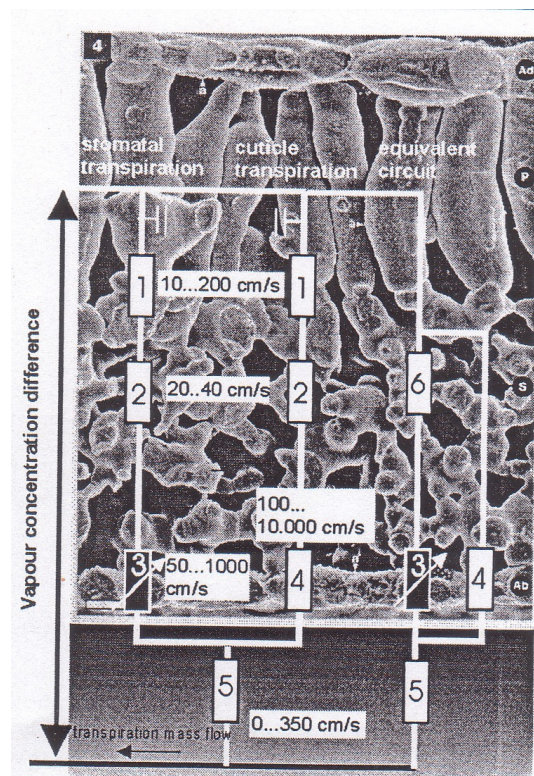


Abb. 8: Elektrisches Analogiemodell des Transpirationsmassenflusses im Blattinneren (SCHMIDT, 2002)

### 2.2.2. Stomatäre Regelung der Transpirationsintensität

Veränderungen der klimatischen Bedingungen im Makroklimabereich (Außenluft) verändern das Wasserpotenzialgefälle im Mikroklimabereich der Pflanze bzw. des Bestands (*passive Pflanzenreaktionen*). Endogene wie auch exogene Faktoren, die die osmoregulatorischen Vorgänge im Pflanzeninneren beeinflussen, setzen die *aktiven Pflanzenreaktionen* in Gang. „Photoaktive“ und „hydroaktive“ Stomatabewegungen sind mit Osmotikaverschiebungen verbunden (LÖSCH, 2001). Faktoren, wie die Globalstrahlung, der  $\text{CO}_2$ -Gehalt, die Feuchtigkeit der Luft und die Temperatur beeinflussen das Öffnungsverhalten der Stomata, mit der Auswirkung auf die Transpiration und  $\text{CO}_2$ -Assimilation (BAKKER, 1991). Soweit die Stomatabewegungen durch die  $\text{VCD}_{\text{I-b}}$  modifiziert wird, ist die Rede von „hydropassiven“ Bewegungen (Abb. 9). Die Größe dieser Stomatareaktionen unterscheiden sich unter den Pflanzenarten und sind je nach Standortanpassung verschieden. Eine Stomataschließung erfolgt bei hohem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck, Wasserstress und Anwesenheit von Abscisinsäure und mehrwertigen Kationen (SCHMIDT, 1989).

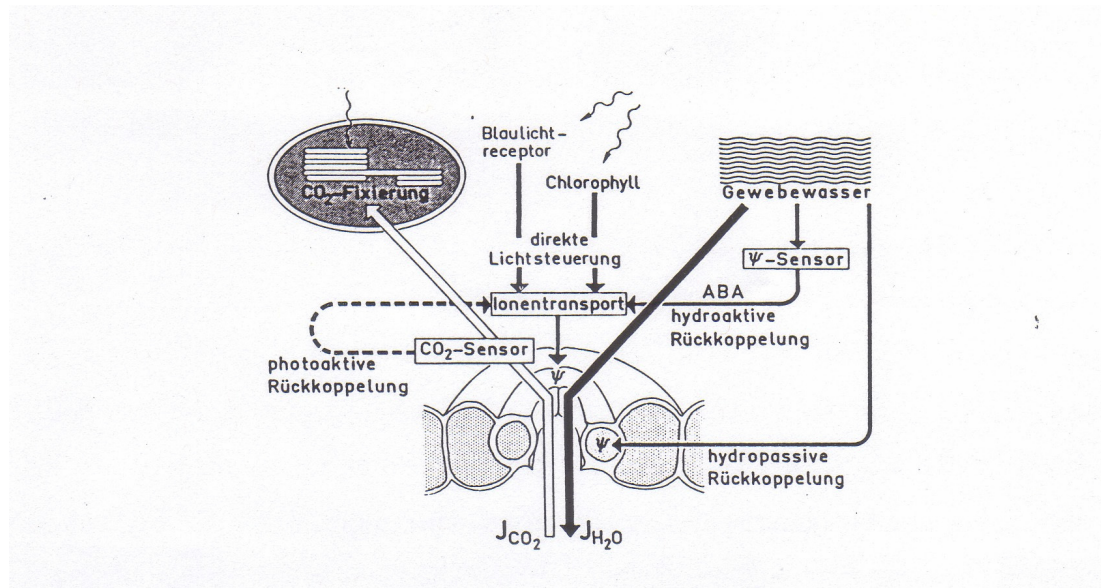


Abb. 9: Modell der Regulation bzw. Steuerung des stomatären Gastransports (MOHR und SCHOPFER, 1992)

Nach SCHMIDT (2003) besteht eine proportionale Beziehung zwischen Transpiration und der  $VP_{d_{l-b}}$  bzw.  $VCD_{l-b}$  nur dann, wenn die Stomata weit geöffnet sind (Abb. 7). Voll geöffnete Stomata verringern den Diffusionswiderstand  $r_D$  enorm. Die stomatäre Transpiration wird wesentlich verstärkt im Verhältnis zur kutikulären. Der Wasserdampf kann leicht aus den Spaltöffnungen in die Luft austreten. In der Abwesenheit einer Stomataregulation beginnt die Xylemkavitation, die zur Zerstörung wichtiger Xylemvenen, und demzufolge zur Senkung der hydraulischen Leitfähigkeit und letztendlich zur Senkung des Blattwasserpotenzials führt. Dem gegenüber reagieren die Stomata mit Schließung, um eine Senkung des Wasserpotenzials der Blätter und Äste zu vermeiden. Der Diffusionswiderstand  $r_D$  nimmt zu und die transpiratorischen Wasserdampfverluste werden eingegrenzt.

### 2.2.3. Einflussfaktoren in der Stomatabewegung

Entscheidende Größen für den Gaswechselprozess im Grenzschichtbereich (GS) sind Blatttemperatur, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte der Pflanzenumgebung (vgl. Gl. 7, 8, 9). Da die direkte Messung der Wasserdampfkonzentration eines Luftvolumens schwer durchzuführen ist, wird sie durch die Beziehung der relativen



der Gewächshausluft stark erhöhen. Bei sehr niedrigem Luftfeuchtigkeitsgrad transpiert die Pflanze im Sättigungsbereich. Die Absenkung des  $VPD_l$  um 1 kPa verursacht eine 65%ige Absenkung der Blattleitfähigkeit (BAKKER, 1991). BAKKER (1990) und COCKSHULL (1990) zeigten, dass hohe Luftfeuchtigkeit bei geringen Lichtverhältnissen im Gewächshaus die Transpiration beschränken und anschließend zu Ertragsverlusten bei Tomatenkulturen geführt haben (in: JOILLET, BAILLEY, 1992).

Auf kurzfristiger Basis hat ein erhöhtes  $VPD_l$  einen negativen Einfluss auf das Pflanzenwachstum, da durch die Stomataschließung auch die Photosyntheserate reduziert wird. Hohe  $VPD_l$ -Werte der Luft verursachen, auf langfristiger Basis, einen erhöhten Zuwachs von Seitenachsen, der bei niedrigen Transpirationsraten endet und somit bis zu 50 % die Blattfläche einschränken kann (JOLLIET, 1993).

Dagegen üben die Lufttemperatur, wie auch der Heizungseinfluss, und die  $CO_2$ -Luftkonzentration keinen signifikanten Einfluss auf die Transpirationsrate aus (JOILLET, BAILLEY, 1992). In der Praxis wird die  $CO_2$ -Düngung in der Winter- und Frühjahrsperiode durchgeführt, da durch die eingeschränkte Lüftung der  $CO_2$ -Luftgehalt in hohen Konzentrationen gehalten werden kann. Dagegen könnten aber die erzeugten niedrigen  $VPD_l$ -Konditionen der Pflanzenentwicklung schaden (ZABRI et al., 1998).

In der niederländischen Produktion basiert die Klimasteuerung hauptsächlich auf Heizungs- und Lüftungsparameter, wodurch auch die Produktionskosten wesentlich steigen (BAKKER, 1994 in: STANGHELLINI et al., 1995). In den mediterranen Ländern werden, in Perioden hoher Temperaturen und intensiver Einstrahlung (April bis Oktober), hohe Bestandstranspirationsraten erwartet. Der transpiratorische Kühleffekt auf die Pflanzenblätter und deren Umgebung wirkt in diesen Regionen effizient und Kosten sparender (BAILLE, 1999 in: KATSOULOS et al., 2002). Bei sehr hohen Außentemperaturen und niedrigen  $VPD$ -Werten hat die Luft ein geringes evaporatives Kühlpotenzial, welches bei heißen und feuchten Bedingungen die Wirkung der Kühlanlagen einschränkt (GIELING et al., 1994). Diese im Sommer und Herbst herrschenden Gewächshausklimakonditionen wirken sich negativ auf die Qualität der Produkte aus (STANGHELLINI, 1993). Nach FERERES (1997) kann die Pflanzung zum richtigen Termin die eingesetzten Wassermengen einsparen. Eine Pflanzung im späten Sommer spart große Wassermengen ein, da zum Zeitpunkt der ausgewachsenen Blattfläche die Evapotranspirationsrate niedrig ist.

Von großem Interesse ist die „*Mittagsdepression des Gaswechsels*“ (Abb. 11), welche während der strahlungsreichen Tageszeiten entsteht. Häufig sind in den Mittagszeiten deutliche Absenkungen der Wasserdampfabgabe und der photosynthetischen  $\text{CO}_2$ -Aufnahme der Blätter zu bemerken, obwohl der Lichtgenuss steigt. Die hier erreichten Temperaturen und Sättigungsdefizitwerte führen zu einer drastischen Stomataschließung. Im Allgemeinen wirken die Temperaturerhöhungen der Atmosphäre auf die Stomata mit einer Erweiterung ihres Öffnungsgrades, allerdings nur bis zu einem artspezifisch unterschiedlich hoch liegendes Optimum (LÖSCH et al., 1981 in: LÖSCH, 2001).

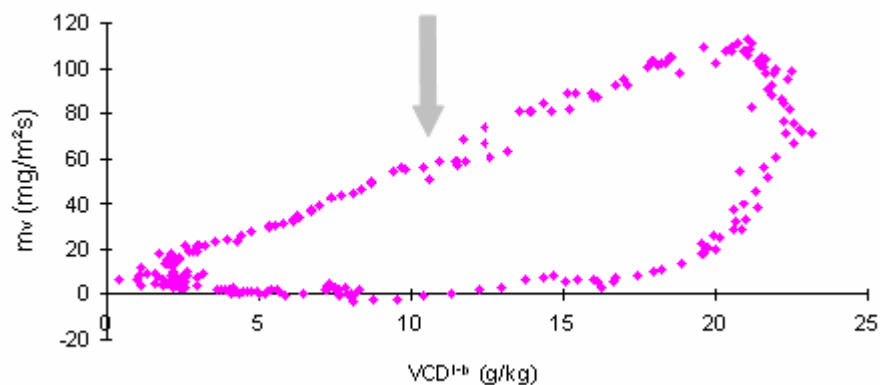


Abb. 11: „Mittagsdepression“ bei *Lycopersicon esculentum*

Die Effizienz der stomatären Kontrolle der Transpiration wird vom Grenzschichtwiderstand  $r_{l.b.}$  beeinflusst (STANGHELLINI, 1993). Der Effekt der Luftbewegung ist verbunden mit dem Anstieg des aerodynamischen Widerstandes auf der blattnahen Grenzschicht, da es nach STANGHELLINI (1987) der einzige Parameter ist, der von der Windgeschwindigkeit abhängig ist. Eine Luftgeschwindigkeit von 1 m/s führt zu einer Transpirationserhöhung von 2,2 mm/Tag (JOILLET, BAILLEY, 1992). Nach STANGHELLINI (1993) ist der  $r_{l.b.}$  einer spezifischen Kultur fast konstant, da die Durchschnittsgeschwindigkeit der Bestandsluft 0,1 m/s, mit minimalen Variationen, ist. Durch Wind kann die feuchte Dampfhaut, die der Epidermis anliegt, abgetragen werden. Die neue ungesättigte Luft, die an der Blattoberfläche vorbeistrickt, begünstigt die Transpiration. Die Luftgeschwindigkeit übt den größten Einfluss auf die Transpirationsintensität aus. Ein Einstrahlungsanstieg von 1  $\text{MJ/m}^2$  und Tag erhöht die Transpiration um 0,09 mm, wobei die Erhöhung des VPD um 1 kPa sie um 0,013 mm pro Tag erhöht. Dabei verursacht die Luftgeschwindigkeit eine



Erhöhung der Transpiration um 0,13 mm/Tag, wenn sie um 1 m/s steigt (XU et al., 1995).

Das sichtbare Tageslicht (380-760 nm) ist wichtig für die Stimulierung der Photosynthese im Mesophyllgewebe. Dieser folgt einer Verminderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Mesophyllgewebe und schließlich eine Erhöhung des osmotischen Potenzials der Schließzellen (Turgoranstieg), was zur Öffnung der Stomata führt. Bei ausreichendem Wasser im Blattgewebe öffnen sich die Stomata bei Licht und schließen bei Dunkelheit. Die passive Öffnungstendenz der Stomata zur Lichtintensität wird von der passiven Stomatareaktion zu den Luft- und Temperaturbedingungen überlagert (LÖSCH, 2001).

Eine stark erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luft führt zur Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Zellinneren, die wiederum die einsetzende Schließbewegung fortreibt. Dadurch vermindert sich das im Zellinneren für die Photosynthese verfügbare  $\text{CO}_2$  und beeinflusst negativ die Photosyntheseaktivität, was zur vollständigen Schließung der Stomata führen kann. Ist die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Schließzellen weniger als 0,05 %  $\text{CO}_2$ , folgt eine Alkalisierung jener und eine Öffnung der Stomata (LIBBERT, 1987). Entscheidend für die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsabhängigkeit der Stomatabewegung ist hauptsächlich die blattinterne Photosynthese/Atmung-Bilanz (BUNCE, 1988 in: LÖSCH, 2001). Die Öffnungsweite der Spaltapparate ist entscheidend für die Trockenmasseproduktion der Pflanzen.

Die Wasserbilanz im Gewächshaus ist von der Transpiration und der Ventilation abhängig. Unter Erhaltung gleicher potentieller Transpiration zur Bewässerungsmenge und sehr hohen Transpirationsraten bei heißen Perioden (Cooling und Befeuchtungseffekt), kann die Wasserextraktion aus dem Substrat maximiert werden (BAILLE, 1994). Das Wasserpotenzial des Bodens übt einen starken Einfluss auf den  $r_{l.b.}$  aus. Als Reaktion auf die Bodenaustrocknung werden von der Wurzel direkte Veränderungen der Schicht der Phytohormone (Auxin, Cytokinin, Gibberellin, ABA) verursacht, was den Öffnungsgrad der Stomata verändert. Unter Wassermangel wird Abscisinsäure (ABA) verstärkt synthetisiert und an Blättern und Wurzeln abgesetzt. Die Anwesenheit hoher ABA-Konzentrationen im Schließzellenplasmalemma aktiviert die  $\text{Ca}^{2+}$ -Kanäle, was die  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration im Cytoplasma erhöht und dadurch den  $\text{K}^+$ -Austritt aus den Schließzellen bewirkt (JONES, 1992; MOHR et al., 1992). Die Blattleitfähigkeit  $g_b$  verringert sich proportional zur ABA-Erhöhung (*langfristiger Effekt*). Dagegen ist die aus der Sättigungsdefiziterhöhung

entstehende Wasserpotenzialsenkung zwischen Blatt und Umgebungsluft (*kurzfristiger Effekt*) nicht proportional zur ABA-Erhöhung im Xylemsaft (WARTINGER et al., 1990). Wenn das Wasserpotenzial der Pflanze eine gewisse Minimalgrenze (meist zwischen  $-5$  und  $-18$  bar) erreicht hat, steigt die ABA-Konzentration im Cytoplasma und in den Vacuolen (HARTUNG et al., 1988; MOHR et al., 1992). Die ABA-Konzentration im Xylemsaft von Pflanzen mit guter Wasserversorgung liegt zwischen  $1$  und  $15$  nmol/l (SCHURR et al., 1992).

Unter niedrigem Wasserstatus und hohem EC-Wert im Substrat werden die stomatäre und die kutikuläre Transpiration eingeschränkt (XU et al., 1995). Hohe Salzkonzentrationen im Substrat verstärken den Stomatawiderstand  $r_s$  bis zum Dreifachen am Abend gegenüber dem frühen Morgen (BOULARD et al., 1997). Bei Wassermangelsituationen sinkt die Transpirationsrate und die Blattemperatur ist höher als die der Luft (PENUELAS et al., 1992). Die übliche Pflanzenreaktion zur Wasserstresssituation ist die erhöhte Wachstumsproduktion im und außerhalb des Blattes (XU et al., 1995). Obwohl bei hydroponischen Verfahren das Wasser nicht zum limitierenden Faktor wird, können Salzkonzentrationen im Substrat milde Wasserstresssituationen hervorrufen, besonders bei hohen Evapotranspirationsraten in den Mittagszeiten.

Um die direkte Reaktion der Schließzellen, ihren Turgor und die Öffnungsweite der Stomata durch klimatische Veränderungen zu beeinflussen, ist eine Steuerung der Transpiration notwendig. Der Mesophyllwasserhaushalt und das entsprechende Wasserpotenzial werden davon nicht betroffen. Dieser Ablauf wurde von FARQUHAR (1978) „feedforward“ (vorwärts gekoppelte Regelung) genannt. Der Einfluss hoher Wasserdampfdifferenzen, die hohe Transpirationsraten erfordern, wird dadurch beschränkt und geringere Wasserverluste treten auf. Bei niedriger Luftfeuchtigkeit können sogar Blattwassergehalt und Blattwasserpotenzial ansteigen (in: LÖSCH, 2001). Wie effektiv dieser Mechanismus in der Transpirationskontrolle eingesetzt wird, hängt von der Höhe des  $r_{l,b}$  und weniger von der Lufttemperatur ab (STANGHELLINI, 1993).



---

### **3. SENSORISCHE UND MODELLIERENDE ERFASSUNG VON WASSERUMSÄTZEN**

Die optimale Steuerung von Wachstumsprozessen im Gewächshaus wird durch die Komplexität der technischen Systeme (Heizung, Lüftung, Bewässerung usw.) und des SPAC-Systems, sowie der entsprechenden Wechselwirkungen, erschwert. Die Gartenbausysteme werden als nichtlineare, langskalierte, komplexe MIMO-Systeme (Multi-Input, Multi-Output) definiert (MURASE, 2000). Je besser diese Systeme zu durchschauen sind, desto eher können diese gezielt beeinflusst werden. Informationen, Daten, Annahmen und Schätzungen über die Tätigkeiten solcher Systeme müssen logisch in einem Computerprogramm miteinander verknüpft, analysiert und ausgewertet werden (WIßMANN et al., 2003). Die unterschiedliche Dynamik zwischen den Gewächshausvariablen, der klimatischen Faktoren und der technischen Gewächshausssysteme ergeben instabile Gewächshausbedingungen. Die Mikroumwelt der Pflanze besteht aus chemischen, physikalischen und biologischen Faktoren, die in Zeit und Raum variabel sind. Die dynamische Reaktion der Pflanze zu ihrer Mikroumwelt steht im Mittelpunkt der optimalen Prozessführung.

Im Mittelpunkt der Bewässerungsmenge steht der Wasserbedarf der Pflanzen. Zur Bestimmung der Quantität und des Zeitpunkts der Bewässerung werden physikalische und biologische Prozesse betrachtet, um der Pflanze optimale Wasser- und Nährstoffbedingungen zu verschaffen. Der Bodenwasserstatus, die hydraulischen Widerstände und Kapazitäten, der Einfluss des Öffnungsgrades der Stomata auf das Wasserpotenzial der Pflanze und die Transpirationsrate charakterisieren die dynamische Reaktion der Pflanze in Zeit und Raum.

Eine geeignete Messtechnik ist die notwendige Voraussetzung für eine Regelung des Wasserumsatzes. Der Bedarf, immer mehr Funktionen einer komplexen Klimaregelung in die praktische Regelung einzubeziehen, und das Erfordernis, gleichzeitig die Wechselwirkungen zwischen den einzeln zu regelnden Größen berücksichtigen zu müssen, hat eine neue Generation von Messgeräten geschaffen. Die Auswahl geeigneter Sensortechnik kann die direkte oder indirekte Messung der Pflanzenaktivitäten ermöglichen. Die gewonnenen Messdaten werden, durch Bearbeitung und Modellierung, für die Bewässerungssteuerung benutzt.

Messungen finden in der Umgebungsluft der Pflanze, im Boden (oder Substrat) oder an der Pflanze selbst statt.

In der Literatur wird mit den Begriffen der Regelung und Steuerung im Zusammenhang mit der Wasserversorgung von Pflanzenbeständen oft unpräzise umgegangen. So ist im Fall der Feuchtigkeitsmessung im Boden bzw. Substrat bereits die Rede von einer Bewässerungsregelung. Wenn die Wassergabe in Abhängigkeit einer Größe erfolgt, die erheblichen Einfluss auf die Transpiration ausübt, dann ist die Rede von einer Bewässerungssteuerung (MACKROTH, 1993). Eine tatsächliche Regelung der Wasserversorgung bedarf jedoch einer Bestimmung des Gesamtwasserumsatzes und einer Reaktion auf Bilanzüberschüsse bzw. -defizite.

In den Produktionsprozessen werden Modelle integriert, die zur Informationsgewinnung und Entscheidungshilfe taugen. Sie werden aus biologischen und physiologischen Größen gebildet, wobei nur die physiologischen von den Klimafaktoren beeinflusst werden. *Empirische* Modelle werden aus Regressionsanalysen der gemessenen Daten, von unterschiedlichen Größen des Systems und durch Analyse der Input-Output-Beziehungen hergestellt. Sie sind einfach und glaubwürdig, haben aber keine generelle Gültigkeit und können in anderen klimatischen Bedingungen oder Kulturstadien oft nicht angewandt werden. Die Beschreibung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Prozesses stellt ein *analytisches* Modell dar. Solche Modelle – wie z.B. die *Energiebilanzmodelle* – haben eine größere Allgemeingültigkeit, da die empirisch gewonnenen Faktoren der dynamischen Modelle physikalisch korrekter ermittelt werden. *Simulationsmodelle*, die durch gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen gebildet werden, können die Weiterentwicklung eines – unter gewissen Anfangsbedingungen – gegebenen dynamischen Systems vorhersagen (HOLTZ, 2001). Bei Fällen, wo aufgrund der hohen Anzahl von Prozessgrößen, messtechnisch nicht erfassbarer Größen oder unbekannter Systemzusammenhänge kein analytisches mathematisches Modell eingesetzt werden kann, bietet der Einsatz von datenbetriebenen Verfahren (*Verhaltensmodelle*) eine Möglichkeit. Zur Erzeugung solcher Modelle werden z.B. künstliche neuronale Netze erfolgreich eingesetzt. Ein solches Modell bietet aber keine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse (*Black Box Modell*). Vorteilhaft sind die *Kombinationsmethoden*, bei denen das Modell, mit Einbeziehung von aktuellen Messwerten, an spezifische Bedingungen angepasst wird (PASCHOLD, 1993).

### 3.1. Bestimmung der Wasserumsätze im Boden/Substrat

#### 3.1.1. Messverfahren zur Bewässerungssteuerung bzw. -regelung

Die Methoden der Bodenmessung zur Steuerung der Bewässerung bestimmen das Wasserpotenzial oder den Wassergehalt des Bodens bzw. des Substrats. Die Messung der Saugspannung (Verfügbarkeit des Bodenwassers) ist der direkte Weg, um das Wasserpotenzial des Bodens zu messen. Die Feuchtigkeit des Bodens wird indirekt durch die Messung der Leitfähigkeit des Bodens für Wärme, Energie oder der Reflexion des Bodens für elektromagnetische Strahlung ermittelt. In den Niederlanden werden in der Praxis Überschussvolumenmessenrichtungen, Tensiometer und Elektrizitätssensoren eingesetzt (BAAS et al., 2001). Der Einsatz solcher Messgeräte ermöglicht die automatische Bewässerungsregelung und die Feuchtigkeitskontrolle der Wurzelzone. Die aktuelle Bodenfeuchtigkeit wird direkt erkennbar gemacht, um eine schnelle Kontrolle der erfolgten Bewässerung zu ermöglichen. Durch den Einsatz mehrerer Sensoren können Probleme der Wasserverteilung rechtzeitig erkannt werden (PASCHOLD et al., 1999).

- Messung des Bodenmatrix

In der Praxis ist die Messung des pflanzenverfügbaren Wassers durch *Tensiometer* üblich. Die Feuchtefühler werden sowohl für die Bewässerungsregelung als auch für die Beobachtung der Wasserbewegung im Boden benutzt. Im Gewächshausanbau sind sie ohne Schwierigkeiten einsetzbar, im Gegensatz zum Freilandanbau, wo noch einige Erfahrungen erforderlich sind (VON BAMBACH, 1993).

Der tensiometrische Fühler besteht aus einem porösen Tonkörper (Kerze), der am Ende eines Plexiglasrohres befestigt ist. Am oberen Teil des Rohres befindet sich ein mechanischer Drucksensor oder elektronischer Druckwandler (Messkopf). Das Messprinzip basiert auf der Einstellung eines hydraulischen Druckes im Tensiorohr, der direkt die Saugspannung des Bodens repräsentiert. Ein *Tensiostat* oder *Schalttensiometer* hat einen Schalter zur elektrischen Betätigung von Magnetventilen oder von Relais. Tensiostaten mit Unterdruckschalter haben einen elektromagnetischen Membran-Sprungschalter (Unterdruckwächter). Im Fall der Analogtensiometer wird ein elektrischer Druckwandler angebracht, so dass ein nachgeschalteter Regler oder Regelcomputer das abgegebene Einheitssignal

auswertet. Je nach dem, wie der Tensiostat oder Tensiometer am Boden bzw. Substrat angebracht ist, wird er als Stecktensiostat oder Flächentensiometer (Mattentensiometer) bezeichnet (MACKROTH, 1993; FRENZ et al., 1980). Zu beachten ist, dass der Tonkörper einen guten Kontakt mit dem Boden (Substrat) hat und keine Hohlräume entstehen, durch das, Wasser in die Tonzelle sickern kann. Das wird durch Einschlammung des Tonkörpers mit einem Ton- bzw. Lehm-Wassergemisch verhindert (BECK et al., 1995).

Ein indirekter Weg, die Bodensaugspannung zu ermitteln, wird durch die elektrische Leitfähigkeit einer Referenzmatrix (Gips, Fiberglas, Nylon) ermöglicht (CAMPBELL, 1988). Bekannt in der Praxis sind die *Gipsblock-* und *Watermarksensoren*. Die Messung beruht darauf, dass durch einen feuchten und mit einer konzentrierten Calciumsulfatlösung gefüllten Sensor, Strom fließen kann. Diese Lösung hat eine höhere Konzentration als die Bodenwasserlösung. Wasser fließt in den Sensor und kleine Gipsmengen lösen sich auf bis die Lösung sich gesättigt hat. Die Lösungsmenge im Gipsblock erhöht sich mit steigender Bodenfeuchtigkeit. Bei der Entwässerung des Sensors wird die elektrische Leitfähigkeit (Widerstand) der Lösung - bei unterschiedlichen Feuchtegehalten - erfasst (HARTMANN, 1995; SOURELL, 1997).

Eine Modifikation des Gipsblocksensors ist der *Watermark-Sensor*. Er unterscheidet sich im Messbereich und in der Lebensdauer. Der Gipsblock bietet einen Messbereich von 30 bis 150 kPa und eine Haltbarkeit von einem Jahr. Entsprechend bietet der Watermark-Sensor 0 bis 200 kPa und 3 bis 5 Jahre (HARTMANN, 1995; PASCHOLD et al., 1999) Einsatzdauer.

Ein weiterer Sensor zur indirekten Messung des Matrixpotenzials vermittelt elektrischer Leitfähigkeit, ist der *Porous Alumina-Sensor*. Er enthält feine Drahtelektroden, die bei jeder Ansaugung des durch den Sensor strömenden Wassers den Widerstandsabfall messen (WAKOH et al., 1992).

- *Wassergehaltsmessung über elektromagnetische Eigenschaften des Bodens*

► **TDR- und FD-Sensoren:** Das Messprinzip des Sensors beruht darauf, dass die Reflexion eines elektrischen Impulses am Ende einer Metallsonde vom Medium umso stärker verzögert wird, je höher die Dielektrizitätszahl des Mediums ist. Diese Zahl hängt vom Volumenanteil der Bodenkomponenten Luft, Wasser und mineralische Substanz ab (SOURELL et al., 1997). Daraus folgt, dass hauptsächlich die

Dielektrizitätszahl des Bodenwassers gemessen wird. Unter Nutzung mathematischer Modelle wird der volumetrische Wassergehalt des Bodens berechnet (WERKOVEN, 1992). Am Markt verfügbare Sensoren sind der DLO-IMAG und der Flori-Sensor (PASCHOLD et al., 1999).

Der FD-Sensor ist einfacher gebaut als der TDR-Sensor (SOURELL et al., 1997) und kann zur Messung der EC der Bodenlösung benutzt werden. Eine hochfrequente Schwingung trifft auf Elektroden, die mit dem Boden zusammen als Kondensator wirken. Weitere Entwicklungen solcher Sensoren sind erforderlich (GIELING, 1998). Mit dem gleichen Prinzip funktioniert das „*Grodan Meter*“. Außer dem Wassergehalt, ermittelt das Gerät auch die EC und die Temperatur der Steinwollsubstrate. Zwei Typen stehen zur Verfügung: der „fix“ Sensor und ein Handmessgerät (STRADIOT, 2001).

► **Neutronensonde/Gammastrahlsensoren:** Ein Strahl schnell bewegter Neutronen wird in den Boden (Substrat) gesendet. Diese Neutronen stoßen auf die Wasserstoffkerne (Protonen) der Bodenlösung. Ihre Geschwindigkeit verringert sich und sie zerstreuen sich. Ein Detektor nahe der Neutronenquelle misst den zurückkehrenden Neutronenfluss. An stationären Messpunkten können ganzjährige Messungen vorgenommen werden (PASCHOLD, 1993; GIELING, 1998).

Ähnlich der Neutronensonde funktioniert die *Gammastrahlmethode*. Anstatt Neutronen werden Photonen gesendet (SOURELL et al., 1997).

► **NMR-Magnetische Kernresonanz:** Bei dieser Messmethode wird ein magnetisches Feld im Boden erzeugt. Die Wasserprotonen werden magnetisiert. Deren Reaktion wird aufgenommen. Mittels NMR wird das Wasser im Wurzelumfeld deutlicher als das Bodenwasser erfasst. Dadurch kann die räumliche Anordnung des Wurzelsystems rekonstruiert werden (BOTTOMLEY et al., 1993).

- *Wassergehaltsmessung über thermodynamische Eigenschaften des Bodens*

► **Wärmeleitfähigkeitssensoren:** Ein isolierter Draht in einem rostfreien Stahlrohr wird mit konstantem elektrischen Strom in bestimmten Zeitperioden erhitzt. Ein Thermoelement misst die Temperatur. Mit Hilfe der Fourier-Gleichung wird die Wärmeleitfähigkeit der bestimmten Bodenstelle berechnet (SCHREVEENS et al., 1992). Eine zweite Variante des Sensors besteht aus einem kleinen Keramikblock, der ein Heiz- und ein Thermoelement enthält. In den Sensor dringt

Feuchtigkeit aus dem Boden ein. Die Geschwindigkeit der Wärmeausbreitung im Sensor charakterisiert dessen Feuchtigkeitsmenge (SOURELL et al., 1997).

► **Hygrometer oder Thermoelemente-Psychrometer:** Das Gerät misst das Wasserpotenzial der Dampfphase im Boden. Thermoelemente messen die Verdunstungstemperatur oder die Temperatur der Taupunktdepression in der Dampfphase. Die Abhängigkeit dieser Bodenluftfeuchtigkeit mit dem Wasserpotenzial  $\psi$  wird aus dem molekularen Gewicht des Wassers  $M_w$  und der gemessenen Feuchtigkeit der Dampfphase  $h'$  berechnet (CAMPBELL, 1986 in: LÖSCH, 2001):

$$\psi = (RT / M_w) * \ln h' \quad (10)$$

### 3.1.2. Modellierung der Wasserumsätze durch den Bodenwassergehalt

Viele Methoden der Bewässerungssteuerung basieren auf Informationen aus dem feuchten Bodenvolumen in der Wurzelzone. Die für eine Bewässerungsregelung notwendige Ermittlung der Wasseraufnahme durch die Pflanze stellt sich kompliziert dar. Sowohl der Wasserfluss im Boden wie auch die Wasseraufnahme sind abhängig von der Wasserverteilung und der Bodendynamik. Die Modelle der Pflanzenwasseraufnahme teilen sich in zwei Kategorien:

- eindimensionale Systeme, bei denen die Wasseraufnahme mit der Tiefe variiert und von festgelegten Wurzelfunktionen abhängig ist (MOLZ, 1971),
- Modelle, bei denen die Wasseraufnahme mit Hilfe der lokalen Bodenwasserverteilung oder des Wasserdruckes im Boden ermittelt wird (LOMEN, WARRICK, 1976). Viele Modelle stellen eine Kombination der oben genannten Kategorien dar (in: OR et al., 1996).

ZUR et al. (1994) präsentieren eine Kontrollstrategie für die Bewässerungsmenge, in der die Geschwindigkeit und die Position der sich ausbreitenden Feuchtezone gemessen wird. Die Bewässerung stoppt, wenn diese Zone eine kritische Tiefe  $Z_L$  erreicht hat. Zur Berechnung dieser Tiefe wird die Geschwindigkeit  $V$ , mit der diese Tiefe erreicht wird, benötigt. Die Geschwindigkeit  $V$  ist von der Applikationsrate  $IR$  und dem Anfangswassergehalt des Bodens  $\Theta_i$  abhängig.

Ermittlungen zur Wasseraufnahme können auch aus der Berechnung der täglichen Wassermenge pro Bodenschicht  $\Theta$  durchgeführt werden. Dabei wird der durchschnittlich volumetrische Wassergehalt  $\theta_{av}(n)$  der Bodenschicht  $n$ , die Dicke der Schicht  $Dn$  und die Zeit mit einbezogen:

$$\Theta = \sum_{n=1}^5 [(\theta_{av}(n) * Dn)_{t-1} - (\theta_{av}(n) * Dn)_t] \quad (11)$$

Zur Bestimmung der Wassereinbindung der Bodenschichten werden Bodenproben aus vier Tiefen entnommen (VOOGT et al., 2000).

Die Ermittlung des Wasserflusses  $q$  (Gl. 12) vom Boden zur Pflanze kann aus dem Wasserpotenzial des Bodens  $\Psi_B$  und der Pflanze  $\Psi_{Bl}$  berechnet werden. Dazu dient die Gleichung von HUNT et al., 1991:

$$q = (\Psi_B - \Psi_{Bl}) / r_{total} \quad (12)$$

$r_{total}$  stellt den gesamten Pflanzenorganwiderstand zum Wasserfluss ( $r_{total} = r_{Boden} + r_{Wurzel} + r_{Stängel}$ ) dar. Das Modell ist für praktische Steuerungsaufgaben nicht geeignet, da die Berechnung der Widerstände Unsicherheiten beinhalten und die kontinuierliche Messung des Blattwasserpotenzials schwierig ist (BATTA, 1989 in: JOILLET et al., 1993).

Die pflanzliche Wasserextraktion  $S$  aus dem Boden kann als Verlust dargestellt werden:

$$S = a(h) S_M \quad (13)$$

$a(h)$  ist eine empirische Funktion des Bodenwasserdruckes  $h$  und  $S_M$  die maximale Wasserextraktionsmenge der Wurzel. Die maximale Extraktionsmenge wird aus der potentiellen Evapotranspirationsrate und der effektiven Wurzeltiefe berechnet (FEDDES et al., 1978 in: STANGHELLINI et al., 1994).

## 3.2. Bestimmung des Wasserbedarfs an der Pflanze

### 3.2.1. Technische Erfassung von Pflanzendaten

Die Ermittlung von optimalen Wasser- und Nährstoffbedingungen der Pflanze durch eine präzise Bewässerung ist nur dann möglich, wenn sich Messsignale exakt und reproduzierbar erfassen lassen und diese auf den gesamten Bestand übertragen werden können. Das „Speaking Plant“-Konzept (HASHIMOTO, 1989) bietet eine Möglichkeit der automatischen Kontrolle anhand direkt gemessener Pflanzendaten. Gegenüber der herkömmlichen Methode der Messung von wasserumsatzbeeinflussenden peripheren Klimagrößen werden im Rahmen des *Phytomonitoring* Technologien angeboten, die die Reaktion der Pflanze auf ihre Umgebung aufzeichnen. Neuentwickelte Sensoren werden zur Messung von Pflanzendaten aus der Pflanze eingesetzt (SCHMIDT, 2002).

Einige Sensoren werden direkt an der Pflanze angebracht (Kontaktmessung) und andere führen Messungen aus mehr oder weniger großem Abstand durch (Fernmessung). Gemessen werden: die Transpiration, die Größe von Pflanzenorganen, die Bestandstemperatur und der Wassergehalt der Pflanze.

- *Transpirationsmessung*

► **Lysimeter oder elektronische Waagen:** Diese Geräte werden in der Praxis und in wissenschaftlichen Untersuchungen verwendet. Im zweiten Fall werden sie oft als Referenzmessgerät für andere Sensoren oder zu deren Kalibrierung benutzt. Ein Teil des Bestands (Pflanzen und Substrat) wird in speziell eingerichteten Containern nach jeder Bewässerung und Drainage gewogen. Die Gewichtssenkung, die zwischen zwei hintereinander liegenden Bewässerungen registriert wird, ist die ET des Systems Boden-Pflanze. VAN MEURS und STANGHELLINI (1992) konnten diese Gewichtsveränderungen im Minutentakt registrieren. Das Lysimeter braucht wenig Wartung und ist für jedes Substrat geeignet. Eine Kalibrierung ist nicht erforderlich.

► **Saftflussmeter** (*Thermoelektrische Methode*): Neben der Ermittlung der Transpirationsintensität lässt sich an der Pflanze auch die Stärke bzw. die Geschwindigkeit des Saftstroms ermitteln. Als Antrieb wirkt der Transpirationssog. Diese Geräte ermöglichen eine direkte Messung des Wasserflusses in der Pflanze.



Zwei Methoden werden zur Saftflussmessung angewandt: die Methode der *thermischen Wärmebilanz (THB)* und die Methode der *Wärmepulsgeschwindigkeiten (HPV)*. Im ersten Fall wird eine konstante Wärmequelle am Pflanzenstängel angebracht. Mit Hilfe von Thermometern wird die Temperatur des Stängels vor und nach der Quelle gemessen, die zur Bildung der Wärmebilanz des Stängels führt. Dadurch wird die Intensität des Verdunstungsverlustes (Transpiration) der Pflanze festgestellt. Vorteilhaft an dieser Methode ist, dass der Massentransport (Transpiration) vom Sensor nicht beeinflusst wird (WEIBEL et al., 1995).

Im zweiten Fall werden eine Wärmequelle und ein Thermosensor über der Quelle am Stängel angebracht. Gemessen wird die Zeit, in der der Wärmimpuls den Thermosensor erreicht. Die Geschwindigkeit des Wärmetransportes korreliert eng mit dem atmosphärischen Verdunstungsanspruch und dem Wasserstatus der Pflanze (SWANSON, 1994; LANGENSIEPEN, 1995).

► **Kammertechnik:** Das zu messende Gewebe (Blatt, ganze Pflanze) wird in einer speziell konstruierten Kammer eingeschlossen. Mit dieser Methode wird hauptsächlich der aus der Nettophotosynthese resultierende  $\text{CO}_2$ -Fluss gemessen, der das Pflanzenwachstum repräsentiert. Es wird zwischen geschlossenen oder offenen und stationären oder transienten Gerätekonzepten unterschieden. Die stationären Kammern verlangen eine Kontrolle der klimatischen Bedingungen, wobei die transient geschlossenen Kammern keine benötigen. Transiente geschlossene Kammern sind portabel, preiswert und können flexibel eingesetzt werden. Sie werden hauptsächlich für Messungen an Blättern benutzt und können mit Hilfe einer geeigneten Kammer auch für Bestandsmessungen adaptiert werden. Die Genauigkeit der transienten Kammer eignet sich eher für die Messung der  $\text{CO}_2$ -Wechselrate als der Evapotranspirationsrate, da der proportionale Wechsel des  $\text{CO}_2$  kleiner ist als der des Dampfdrucks (PICKERING et al., 1993).

► **Diffusionsporometer:** Ein weiteres Instrument zur Messung der photosynthetischen Aktivität der Pflanze ist das Diffusionsporometer. Gemessen wird der  $r_s$  gegen die Wasserdampfdiffusion in den Pflanzenblättern. Ähnlich wie in der Kammertechnik wird auch hier das Blatt in einer Kammer oder Küvette eingeschlossen. Sie unterscheiden sich in dynamischen Porometer und Massenstromporometer.

► **Eddy Covariance Methode:** Zur Ermittlung der Bestandsevapotranspiration wird die latente Wärmeflussdichte ( $\lambda E$ ) gemessen. Hohe Fluktuationsfrequenzen der Temperatur, der absoluten Feuchtigkeit und der vertikalen Windgeschwindigkeit werden dabei gemessen. Zur Erfassung dieser Daten stehen ein Anemometer und ein Hygrometer oder Gasanalysator zur Verfügung. Die Genauigkeit der Messungen kann über die Energiebilanzgleichung getestet werden (SNYDER et al., 2000).

► **Ultraschall (Akustische) Methode:** Die Kavitation des Wassers im Xylem und der nachfolgende Embolismus verursachen eine signifikante Senkung der Xylemleitfähigkeit, die die kontinuierliche Wasseraufnahme negativ beeinflussen (TYREE et al, 1986 in: RITMAN et al., 1988). Die akustische Emission steht ebenfalls in Verbindung mit der Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit im Xylem (RANASINGHE et al., 1995). Die durch dieses Phänomen produzierten Geräusche werden mit Hilfe geeigneter Geräte aufgenommen. Eine ableitende Technik erlaubt die Ermittlung von Ultraschallvibrationen. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit eines Ultraschallpulses berechnet. Mit steigender Transpiration sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit. Sobald der Wasserstatus der Pflanze steigt, hört die Emission der Geräusche auf (RITMAN et al., 1988).

► **NMR-Spektrometer:** Durch Protonen mit niedrigem Magnetfeld wurde die Saftstromrate an Gurkenpflanzen gemessen. Der Kurvenverlauf der Rate hatte Ähnlichkeiten mit den Verläufen der Transpirations-(Lysimeter) und Wasseraufnahmerate (Porometer). Gewisse Abweichungen traten in Bezug auf die Wasseraufnahmerate auf, denn die Saftstromrate lag nachts bei 10 % und Tags bei 20 % über jener (VAN DE SANDEN et al., 1992).

- *Messung des Pflanzenwassergehalts*

► **Hygrometer:** Das Hygrometer ist ein Psychrometer, das am Stängel oder am Blatt der Pflanze in Form einer Kammer oder Küvette angebracht wird. Die Funktion ist ähnlich der eines Psychrometers, d.h., es wird die Luftfeuchtigkeit in der Kammer, die sich im Gleichgewicht mit dem totalen Wasserpotenzial des Organs befindet, gemessen. Unter konstanten Konditionen erlaubt diese Methode eine kontinuierliche Analyse (HERPPICH et al., 1995).

► **Xylem Drucksonde:** Ein Versuch, die Spannung in den Xylemvenen direkt zu messen, wurde von BALLING et al. (1990) durchgeführt. Ein feines Mikrokapillar wurde in eine Xylemvene direkt eingeführt. Dieses kam ins Gleichgewicht mit der

Spannung des Xylemsaftes, welches weiterhin mit Hilfe eines Druckmesswandlers gemessen wurde. Das Xylem-Wasserpotenzial ist viel stabiler als das Blattwasserpotenzial und lässt sich weniger von den Umgebungsfluktuationen beeinflussen (in: JONES, 1997).

► **Weitere Kontaktmessungsmethoden:** Ähnlich wie bei der Messung der Bodenfeuchtigkeit (vgl. Kap. 3.1.1.) werden die NMR- und  $\gamma$ -Strahlmethoden zur Ermittlung des Wassergehaltes der Pflanzen eingesetzt.

- *Messung von Organgrößen*

► **LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) Sensor:** Mit Hilfe eines Wegmesswandlers wird der Durchmesser oder die Breite pflanzlicher Organe gemessen. Aus den gewonnenen Daten wird das tägliche, kumulative Wachstum der Organe und deren kurzfristige Reaktion zu den Außenkonditionen ermittelt (BAILLE, 1992). Hauptsächlich wird dieser Sensor zur Messung der kurzfristigen Änderungen des Stängel- oder Stammdurchmessers eingesetzt. Die Tagesschrumpfung oder Nachtexpansion des Stängels oder Stamms steht in enger Korrelation mit dessen Wasserpotenzial bzw. mit dem Turgor der Zellen. Enge Beziehungen wurden auch zwischen der Tagesschrumpfung des Stängels und der Bodenfeuchtigkeit festgestellt (LI et al., 1990 in: SIMONNEAU et al., 1993). Gleiches gilt für das Sättigungsdefizit der Atmosphäre. Bei der Substratkultur wurden direkte Beziehungen zum stomatären Leitwert, zur Nettophotosynthese und zu klimatischen Bedingungen aufgezeigt (BRUN et al., 1992). Eine lineare und signifikante Korrelation wurde zwischen der Blattdicke und dem Blatzturgorpotenzial festgestellt (SHARON et al., 2001). Die Einsatzmöglichkeit dieses Sensors wurde auch zur Erkennung von Salzstress in Substratkulturen von Tomatenpflanzen untersucht. Die Applikation des Salzstress kam zu einem Anstieg der maximalen täglichen Kontraktion, die sich bei zunehmendem Salzgehalt weiter verstärkte (BRUN et al., 1992). Der Sensor wird auch zur Messung von Fruchtgrößenänderungen eingesetzt.

- *Messung der Bestandstemperatur*

► **Infrarot Thermometer-IRT** (*Infrared Thermometer*): Ein direkter und berührungs-loser Weg zur Erfassung der Blatttemperatur an Pflanzen ist die Fernerkundungs-methode (*Remote Sensing Method*). Das Thermometer ist so gefiltert, daß der Detektor nur spezifische Wellenlängen (typische Wellenlänge zwischen 8 und 14 µm) aufnimmt. Die gemessene Energie wird mit Hilfe physikalischer Gesetze in Temperaturmengen umgewandelt. Die Ermittlung des Wasserstresses aus der Temperaturdifferenz zwischen Blatt und Umgebungsluft basiert auf der Annahme, dass das transpirierende Wasser die Pflanzenblätter abkühlt. Bei Wassermangel transpirieren die Pflanzen weniger und sind demzufolge wärmer als die Umgebungsluft (STANGHELLINI et al., 1994). In Anlehnung an diese Messmethode wurden zwei Stressindikatoren entwickelt, der CWSI (Crop Water Stress Indikator – vgl. Gl. 24) und der *Stress-Degree Day*.

### 3.2.2. Transpirationsmodelle

Die Integration von Pflanzendaten aus direkter Pflanzenmessung in die Gewächshausklimasteuerung ist vorteilhaft. Die neuen Annäherungen erklären insofern nicht die Pflanzenreaktionen, sondern versuchen, durch empirisch gewonnene Beziehungen ein Kontrollsystem, mit Hilfe künstlicher Intelligenz als Black Box Modell, zu entwickeln (EHRET et al., 2001).

Die Mehrheit der Modelle basieren auf der Energiebilanz (thermische Bilanz) des Pflanzenbestands. Die Transpiration wird als ein Teil der Energiebilanz beschrieben:

$$R_n - H - G - \lambda E = 0 \quad (14)$$

Die meisten dieser Modelle beziehen sich auf das von Penman-Monteith-Modell oder PM-Modell (MONTEITH, 1965, 1973 in: ZHANG et al., 1992):

$$\lambda E = \{ \Delta (R_n - G) + (\rho_l c_p / r_a) [e^*(t_l) - e] \} / \Delta + \gamma (1 + r_c / r_a) \quad (15)$$

Die meisten Modelle wurden entwickelt unter der Annahme, dass die Kultur in gut bewässerter Kondition ist. Der generelle Ausdruck dieser Modelle ist wie folgt:

$$Tr = a' R_n + b' VPD_i \quad (16)$$

Die Faktoren  $a'$  und  $b'$  werden generell aus Funktionen des Blattflächenindex (LAI) und der Widerstände (stomatärer, aerodynamischer) kalkuliert. Die Modelle unterscheiden sich hauptsächlich in der Kalkulation des Einstrahlungsabsorptionskoeffizienten, des  $r_s$  und des  $r_a$ . Der Koeffizient der Einstrahlungsabsorption ist abhängig von Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und dem Entwicklungsstadium der Kultur. Die Kreuzkorrelation zwischen der Strahlung und des  $VPD_i$  sollte ausgeschlossen werden, wenn deren Einfluss auf die Transpiration gemessen werden sollte (JOILLET et al., 1992; JOILLET, 1993). Das auf dem PM-Modell basierende Transpirationsmodell von BOULARD et al. (1991) wurde an einer Tomatenkultur validiert. Es wurde als exakt bezeichnet, soweit keine Stresskonditionen auftreten. Obwohl das Modell die Stomataregulation in Beziehung zur Lufttemperatur und zum VPD berücksichtigt, hat es keine Validität mehr, wenn die maximale Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit die 28°C und 18 mb entsprechend überschritten haben (in: BOULARD et al., 1997).

Der  $r_s$  kann als Funktion mehrerer klimatischer Variablen dargestellt werden (STANGHELLINI, 1987; YANG et al., 1990), wobei der  $r_a$  durch nichtdimensionale Gruppen ermittelt werden kann (in: ZHANG et al., 1992). Die wichtigsten Einflussfaktoren der Stomataleitfähigkeit  $g_s$  sind das  $VPD_i$  und die Einstrahlung (JOILLET, 1993). STANGHELLINI (1987) präsentiert ein Berechnungsmodell des  $r_s$ , das auf der Nettostrahlung, dem  $VPD_i$ , der Blatttemperatur und der  $CO_2$ -Konzentration basiert. Die Variationen des  $r_s$  sollten zur Bewertung der Transpirationsvariationen unter Berücksichtigung des  $r_{l.b.}$  skaliert werden. Die Transpirationsrate wird nicht sehr stark vom  $r_{l.b.}$  beeinflusst, so dass in den meisten Fällen ein konstanter Wert, kalkuliert für eine vorherrschende Luftgeschwindigkeit im Gewächshaus, eingesetzt werden kann (STANGHELLINI, 1993).

STANGHELLINI et al. (1995) führen eine neue Schreibform des PM-Modells ein:

$$Tr_R = g_{Trans} (x_c - x_l) \quad (17)$$

$g_{Trans}$  ist die „Transpirationsleitfähigkeit“ und  $x_c$  die „effektive Dampfkonzentration“ an der „big- leaf“ Oberfläche. Sie werden wie folgt berechnet:

$$g_{\text{Trans}} = 2\text{LAI} / [(1 + \varepsilon)r_{\text{l.b.}} + r_s] \quad (18)$$

$$x_c = x_l^* + \varepsilon r_a R_n / 2\text{LAI} \lambda \quad (19)$$

Der erste Teil von  $x_c$  wird direkt von der Lufttemperatur hergeleitet, wobei der zweite Teil proportional zur Nettostrahlung ist. Der Grenzschichtwiderstand  $r_{\text{l.b.}}$  wird aus einer empirischen Formel berechnet (STANGHELLINI, 1987) unter Einbeziehung der Blattdimension, der ambienten Temperatur und der Luftgeschwindigkeit. Zur Berechnung des  $r_s$  wird eine zweite empirische Gleichung angeboten, für die der Durchschnitt der kurzwelligen Einstrahlung benötigt wird (in: STANGHELLINI et al., 1995).

YANG et al., 1990 präsentieren  $r_s$  als eine empirisch gewonnene Funktion der Einstrahlung. Dieses Regressionsmodell kann aber die Nachtfluktuationen des Widerstandes nicht erklären und ist nur für die Tageszeit geeignet. CHALABI und BAILY (1989) nehmen an, dass sich  $g_s$  zwischen zwei konstanten Werten ändert und somit abhängig nur von der Einstrahlung ist. AIKMAN und HOUTER (1990) behaupten, dass  $g_s$  zwischen einem konstanten Tageswert und einem konstanten Nachtwert schwankt. Nach JOILLET und BAILEY (1992) ergeben die ET-Modelle mit konstanten Stomataleitfähigkeitswerten falsche Aussagen über den Einfluss des VPD auf die Transpiration. Dabei präsentieren sie eine Regressionsgleichung zur Berechnung der  $g_s$ . Diese Gleichung stellt die Stomataleitfähigkeit in Abhängigkeit zur Einstrahlung und zum VPD dar (in: JOILLET et al., 1992).

Eine auf das PM-Modell basierende Methode zur Berechnung der aktuellen ET auf täglicher Basis wird von RANA et al. (2000) angeboten. Der Bestandswiderstand  $r_c$  wird mit Hilfe eines täglichen Koeffizienten, der eine Funktion des Blattwasserpotenzials darstellt, berechnet. Der Widerstand und die meisten Wetterparameter werden in einem Koeffizienten C miteinbezogen. Unter Veränderung des verfügbaren Bodenwassers muss dieser Koeffizient als Funktion von Parametern dargestellt werden, die die Wasserkondition der Kultur beschreiben. Als Indikator für den Wasserstatus der Pflanze wird das pre-dawn Blattwasserpotenzial  $\Psi_b$  eingeführt (RANA et al., 1997 a, b in: RANA et al., 2000):

$$C = a \Psi_b + b \quad (20)$$

Die Transpiration wird wie folgt berechnet:

$$Tr = C * A' * \Delta / \Delta + \gamma \quad (21)$$

$A'$  ist die verfügbare Energie in MJ/ m<sup>2</sup>.

BAILLE et al. (1994) bietet eine weitere Gleichung zur Berechnung des Oberflächenwiderstands  $r_o$  in Abhängigkeit von der Globalstrahlung  $R_s$  und dem  $VPD_l$  an, unter der Annahme, dass der Blattwiderstand  $r_b$  die meisten Charakteristika des  $r_s$  beinhaltet:

$$r_o = r_{min} / LAI f_1(R_s) f_2(VPD_l) \quad (22)$$

$r_{min}$  ist der minimale Wert des  $r_s$ , der mit einem Porometer gemessen wird. Die Funktion für die Globalstrahlung wird aus der Gleichung von STANGHELLINI (1987) abgeleitet, wobei das  $VPD_l$  aus einer nicht lineare Funktion der Feuchtigkeit (SCHULZE, 1986) berechnet wird. Nachteilig ist allerdings, dass die aktuelle Nettostrahlung in den kommerziellen Gewächshäusern schwer zu messen ist (in: BAILLE et al., 1994).

Der  $r_a$  wird aus nichtdimensionalen Gruppen ermittelt. Die Gleichungen von KREITH (1965) und FUJII et al. (1973) ergeben ein gutes Ergebnis, wenn die Blatttemperatur kühler als die der Luft ist. Die Gleichung von STANGHELLINI (1987) unterbewertet den Widerstand. Das PM-Modell ist relativ sensitiv in Beziehung auf Fehler bei der Berechnung des  $r_a$  (in: ZHANG et al., 1992).

Ein 3D Pflanzen/Bestand-strukturbasierendes Modell für Bäume und Orchaden präsentieren DAUTET et al., 2000. Das RATP-Modell (Radiation, Absorption, Transpiration, Photosynthesis) von SINOQUET et al. (2000) berücksichtigt die räumliche Verteilung der Blattfläche, die physiologischen Eigenschaften und die klimatischen Parameter. Dabei wird die von McNAUGHTON und JARVIS (1983) und JARVIS und McNAUGHTON (1986) reformulierte Version des PM-Modells eingesetzt:

$$ET = \Omega E_{eq} + (1 - \Omega) E_{im} \quad (23)$$

$\Omega$  ist der Bltentkoppelungsfaktor,  $E_{eq}$  die Gleichgewichtstranspiration und  $E_{imp}$  die verminderte Transpiration (in: DAUTET et al., 2000).

Die Erkennung von Wasserstress an Pflanzenbeständen mit Hilfe der Bestandstemperatur basiert auf der Annahme, dass unter wasserlimitierenden Situationen eine Transpirationseinschränkung und eine Blatttemperaturerhöhung stattfinden. ZHANG et al. (1995) präsentieren ein auf PM-basierendes-Transpirationsmodell aus der Kombination von meteorologischen und fernerkundeten Messdaten (remote sensing data). Der  $r_a$  wird aus der Monim-Obukhov-Oberflächenschicht-Ähnlichkeitstheorie hergeleitet (BRUTSAERT, 1982), wobei der Oberflächenwiderstand  $r_o$  aus der Energiebilanzgleichung mit Hilfe von Fernmessungen der Blatttemperatur berechnet wird (in: ZHANG et al., 1995).

Temperaturbasierend ist auch das Modell von VON KJELGAARD et al. (1996) zur Berechnung integrierter täglicher ET-Raten (CTEB-Model, Canopy temperature energy balance). Die Berechnung des  $r_a$  wird durch zwei Methoden der atmosphärischen Stabilitätskorrektur geführt: die von CAMPBELL (1977) durch Messung der Pflanzenhöhe und der Windgeschwindigkeit und die mehr empirische, durch Temperaturmessungen, von MONTEITH (1963, 1973). Der gleichen Methode folgten auch INOUE et al. (1990). Anhand einer empirischen Formel des  $r_{b.l.}$  wird der stomatare Widerstand berechnet. Die lineare Funktion der Differenz der Blatt-Lufttemperatur zum  $VPD_l$  schlugen IDSO et al. (1981) vor. Dieser empirisch ermittelte CWSI (Crop Water Stress Index) wurde durch die theoretische Prozedur von JACKSON et al. (1981) verbessert. Außer der Lufttemperatur und dem  $VPD_l$  werden zusätzlich die Strahlung, der  $r_a$  und der  $r_c$  einbezogen (JACKSON et al., 1981 und 1988):

$$CWSI = \gamma (1 + r_c/r_a) - \gamma^* / \Delta + \gamma (1 + r_c/r_a) \quad (24)$$

Der CWSI bestimmt den Zeitpunkt der Bewässerung aber nicht die Menge. Er wird auch als Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Transpiration dargestellt (BAILLE, 1992). Transpirationsmodelle, die Temperaturmessdaten miteinbeziehen, sind nicht sehr glaubwürdig und sollten nur dann eingesetzt werden, wenn die anderen Klimafaktoren nicht zur Verfügung stehen (MCKENNEY et al., 1993).

CASTELLVI et al. (1996) stellen die weit verbreiteten VPD-Modelle dar. Diese Modelle sind nicht lagespezifisch und können in jedes ET-Modell eingefügt werden.



Die bekanntesten und praktizierteste VPD-Gleichung ist die von JENSEN et al., 1990:

$$VPD = e^* (T_{hr}) - e^* (T_d) \quad (25)$$

$e^*(T)$  ist der Sättigungswasserdampfdruck (kPa),  $T_{hr}$  die stündliche Durchschnittstemperatur und  $T_d$  die stündliche Durchschnittstemperatur im Taupunkt. Sie gibt den VPD auf einer Stundenbasis an. Weitere Modelle (DOORENBOS, PRUITT, 1977; SCHMITH et al., 1991; JENSEN et al., 1990) kalkulieren den VPD auch auf täglicher Basis. Ein einfaches VPD-Modell wird von CASTELLVI et al. (1996), für Zeitperioden zwischen stündlicher und täglicher Rate, formuliert. Die berechneten VPD-Werte können in mehreren ET-Modellen eingesetzt werden, in denen nur die Temperatur, der Niederschlag und die Einstrahlung zur Verfügung stehen (in: CASTELLVI et al., 1996).

Ausgehend von der Energiebilanz des Blattes modellierte TANTAU (1987, 1992) die relative Stomataöffnung. Er führte das Wasserdeckungsverhältnis  $\xi$ , als Verhältnis der Blatttranspiration zur potentiellen Evaporation einer freien Wasseroberfläche, ein, das die aktuelle Transpirationsrate darstellt. Es dient als Kriterium für die relative Öffnung der Stomata:

$$\xi = \{c_p * [2*(t_b - t_l) - R_n * F_g / h_c * F_b] / q_v * [x_l - x_{sb}]\} \quad (26)$$

Luft- und Blatttemperatur, Nettostrahlung und Luftfeuchtigkeit werden durch Messung ermittelt und der Wärmetransportkoeffizient ( $h_c$ ) sowie die Blattoberfläche werden geschätzt. Die Transpiration wird im Wärmeäquivalent ( $q_t$ ) aus dem folgenden Modell ermittelt:

$$q_t = (h_c / c_p) * \xi * (F_l / F_g) * q_v * [x_l - x_{sb}] \quad (27)$$

Die Transpirationsmassenflussdichte wird von SCHMIDT (1989) proportional zur  $VCD_{l-b}$  modelliert (vgl. Gl. 9). Um die schwierige und unsichere Bestimmung des Koeffizienten zu umgehen, wird eine neue Methode der Transpirationssmessung mehrerer Blätter (Phytomonitor-EPM) angeboten (vgl. Kap. 4.3.1.). Mittels der gemessenen Haupteinflussgrößen des Gewächshausklimas (Wärmestrahlung,

Lufttemperatur und Luftfeuchte im Bestand und Transpirationsmassenstromdichte) und mit Hilfe eines thermischen Modells (SCHMIDT, 1989; FÖRTSCH, SCHMIDT 1990), wird die Bestandstemperatur berechnet. Eine weitere Ausgangsgröße dieser Messmethode ist der stomatäre Leitwert  $\lambda_b$ , der sich aus dem Verhältnis der gemessenen Transpirationsmassenstromdichte  $m_v$  zur gemessenen  $VCD_{l-b}$  ergibt:

$$\lambda_b = m_v / [\rho_l / Le^{2/3} (x_s(t_b) - x(t_l))] \quad (28)$$

Das Modell von HEISSNER (1997) beruht auf der gleichen physikalischen Annahme, dass die Transpirationsrate proportional zur Wasserdampfkonzentration zwischen dem Blatinneren und der Umgebungsluft ist (KITANO et al., 1990; THORN-LEY und JOHNSON, 1990; WILLERT et al., 1995). Sie wird als das Produkt der Leitfähigkeit  $g(i)$  für den Wasserdampftransport in der Luft und der Dampfdichte-differenz  $\Delta\rho_l(i)$  dargestellt:

$$E(i) = g(i) \Delta\rho_l(i) \quad (29)$$

Um die Transpirationsrate des gesamten Bestands zu beschreiben, wird die Transpiration von drei Bestandsschichten betrachtet. Die Leitfähigkeit wird aus einer empirischen Funktion der Bestrahlungsstärke berechnet. Die Dampfdichtedifferenz wird aus der Blatttemperatur und dem gemessenen Dampfdruckdefizit des Bezugspunktes ermittelt (in: HEISSNER, 1997).

### **3.3. Bestimmung der Wasseranforderungen aus den Klimabedingungen**

#### **3.3.1. Indirekte Erfassung durch Messung der Umweltfaktoren**

Faktoren wie das Dampfdruckdefizit, die Global- oder Nettostrahlung werden gemessen und zur indirekten Bestimmung der Wasserbedürfnisse der Pflanzen eingesetzt. Zur Quantifizierung der Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus steht eine Vielzahl von Messgeräten zur Verfügung.

Bevorzugt wird in der Praxis die Methode des „*Solintegrators*“, der die Globalstrahlung im Gewächshaus misst und sie über die Zeit integriert. Die Bewässerung

erfolgt nach dem Erreichen einer vorgewählten Strahlungssumme und für eine vorher festgelegte Zeitdauer. Vorteilhaft ist, dass keine Signalleitungen im Pflanzenbestand erforderlich sind, die das Arbeiten im Gewächshaus erschweren. Obwohl die Ermittlung der Wasserbedürfnisse einfach ist, stellt diese Methode nicht immer eine hochprozentige Korrelation zwischen Strahlungswerten und Wasserbedarf dar. In den Wintermonaten ist der Einfluss der Globalstrahlung eingeschränkt und die Wasserbedürfnisse werden hauptsächlich von anderen Faktoren, wie Luftfeuchtigkeit, Wachstumsstadium der Pflanze etc., bestimmt (Abb. 12). Auch im Sommer liegt die Korrelation zwischen Strahlung und Wasserbedürfnissen höchstens bei 90 %. Diese 10%ige Abweichung kann sich in drei Tagen summieren und zu einer Fehlbewässerung führen (MACKROTH, 1993).

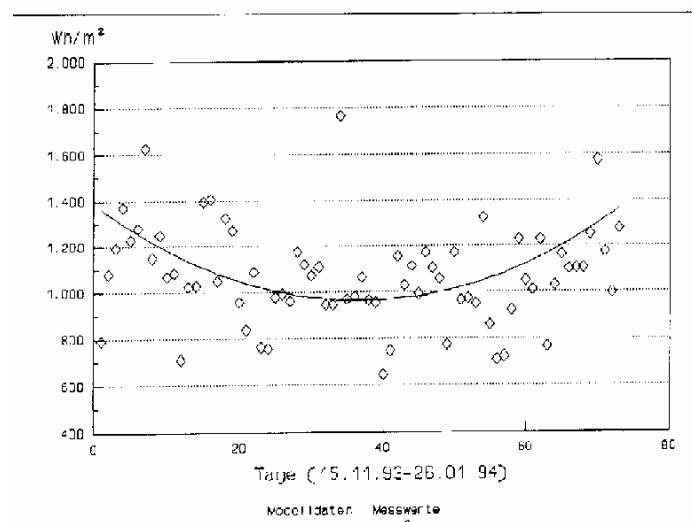


Abb. 12: Abhängigkeit des pflanzlichen Wasserbedarfs von der Einstrahlungssumme (SCHULTE, 1986 in: VON BAMBACH, 1993)

Ein weiteres Messgerät ist der sogenannte „*Verdunstungsmesser*“. Ein Gefäß wird mit Sand und Wasser gefüllt. Nach Verdunstung der vorher festgelegten Wasser-menge aus der Sandoberfläche beginnt die Bewässerung. Gleichzeitig wird das Ge-fäß wieder aufgefüllt (MACKROTH, 1993).

### 3.3.2. Klimamodelle

Verschiedene Regressionsgleichungen ermitteln die ET in Abhängigkeit von den klimatischen Konditionen im Gewächshaus. Hohe Korrelationen zwischen der Innenstrahlung oder/und des Dampfdruckdefizits und der Transpiration wurden in umfangreichen Experimenten für eine Mehrzahl von Kulturen festgestellt (JOILLET, 1993; MCKENNEY et al., 1993). In Südfrankreich wurde ermittelt, dass die Bestandstranspiration zu 50-60 % von der eingetroffenen Globalstrahlung abhängig ist (STANHILL, ALBERS, 1974 in: BAILLE et al., 1994). Unter Einbeziehung der Pflanzenhöhe im Korrelationsverhältnis der zwei Faktoren, kann diese Äquivalenz bis auf 70 % erhöht werden (ROTHWELL et al., 1961 in: KIRDA et al., 1994).

MALOUPA et al. (1993) vermuten, dass die potentielle Transpiration gleich der im Gewächshaus infiltrierten Strahlung  $R_{s0}$  ist:

$$Tr_p = R_{s0} = R_s C1 C2 \quad (30)$$

Eine lineare Beziehung zwischen der täglichen Sonnenstrahlung und der Transpiration stellen auch KIRDA et al. (1994) bei einer Tomatenkultur unter mediterranen Gewächshausbedingungen fest. Der tägliche Wasserverbrauch der Kultur U wird aus der täglichen Gesamtstrahlung wie folgt dargestellt:

$$U = R_t / 58,5 f \quad (31)$$

Die Regressionsgleichung zwischen ET und der Strahlung in 120 cm Höhe über den Pflanzenbestand lautet:

$$ET = 1,15 \cdot 10^{-2} R^t + 1,383 \quad (32)$$

Der tägliche Wasserverbrauch wird daraus berechnet:

$$U = f(1,486E - 2,051) \quad (33)$$

Lineare Beziehungen zwischen der Transpiration und der Einstrahlung und des Dampfdruckdefizits werden auch von JOILLET und BAILEY (1992) bei einer

Tomatenkultur festgestellt. Der Vergleich unterschiedlicher Regressionsmodelle der Einstrahlung für eine Tomatenkultur zeigt, dass solche Modelle einen limitierten Einsatz haben. Solche Modelle müssen für jede Situation durch neue Koeffizienten angepasst werden. Die Einbeziehung des VPD in die Einstrahlungsregressionen der ET erhöht das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  auf 0,87 und reduziert den Standardfehler auf 17% (JOILLET, 1993).

BOULARD und JEMAA (1993) stellen für eine Gurkenkultur eine ähnliche Beziehung der Transpiration zur Innenstrahlung  $R_i$  und dem  $VPD_i$  dar:

$$Tr_R = A (1 - \exp(-K LAI)) R_i + B LAI VPD_i \quad (34)$$

Im Verlauf des Pflanzenwachstums schränkt sich die Relation zwischen Transpiration und  $VPD_i$  ein. Die Koeffizienten müssen dem Wachstumsstadium angepasst werden (in: LORENZO et al., 1998).

Pflanzliche Daten, wie die Blattflächenentwicklung, werden in solchen Regressionsgleichungen integriert, um das Modell zu korrigieren (DIEZEMANN et al., 1987). Das HAUDE-Modell ist ein klassisches Beispiel aus Deutschland, das die  $ET_p$  als Regression des  $VPD_i$  mit Rücksicht auf die Pflanzenentwicklung, darstellen (in: LÖPMEIER, 1994):

$$ET_p = a (e^* - e) \quad (35)$$

DE GRAFF und ESMEIJER (1998) berechnen die aktuelle Transpiration durch Daten der Globalstrahlung  $R_a$  außerhalb des Gewächshauses:

$$Tr = (a_T R_a + b_T DM) s \quad (36)$$

Ein weiteres Modell zur Berechnung der Transpiration aus den externen Klimakonditionen für warme Klimabedingungen und einfacher Gewächshausstruktur bieten BOULARD et al. (2000). Der in der Energiebilanzgleichung eingeführte Solarwärmeeffizient  $a$  moduliert den Einstrahlungsfaktor sehr stark (SEGINER und ALBRIGHT, 1983; BOULARD und BAILLE, 1993). Er wird aus der Energiebilanz des Gewächshauses über 24 Stunden ermittelt. Das  $VPD_i$  des Gewächshauses wird als

lineare Funktion des VPD und der Außentemperatur dargestellt (in: BOULARD et al., 2000).

Zu den Untersuchungen, inwieweit die einfach gemessenen Parameter Einstrahlung, Luftfeuchte, Blatttemperatur und Lufttemperatur zur Bewässerungssteuerung verwendet werden können, wird von BECK (2000) ein Modell vorgeschlagen, dass den Wasserumsatz (Transpiration) seit dem letzten Bewässerungsvorgang berechnet. Die gemessenen Daten der klimatischen Faktoren wurden durch Integration hochsummiert und zu den gemessenen Wasserumsätzen (Lysimetermethode) korreliert. Eine einstrahlungsabhängige Bewässerungssteuerung ohne Veränderung und Anpassung der zu Kulturbeginn eingestellten Einstrahlungssummen ist nur bedingt möglich. Diese Steuerungsstrategie berücksichtigt einerseits die Nachttranspiration und andererseits die Einflüsse der einzelnen Gewächshausabteile nicht, da sich der Sensor außerhalb des Gewächshauses befindet. Eine höhere Korrelation zum Wasserumsatz zeigen die Sättigungsdefizit- und Dampfdruckdifferenzsummen. Die Kombination mehrerer Einflussgrößen (Einstrahlungssumme, Sättigungsdefizitssumme, Pflanzenwachstum, Blattfläche) erhöht die Korrelation zum Wasserumsatz (Abb. 13).

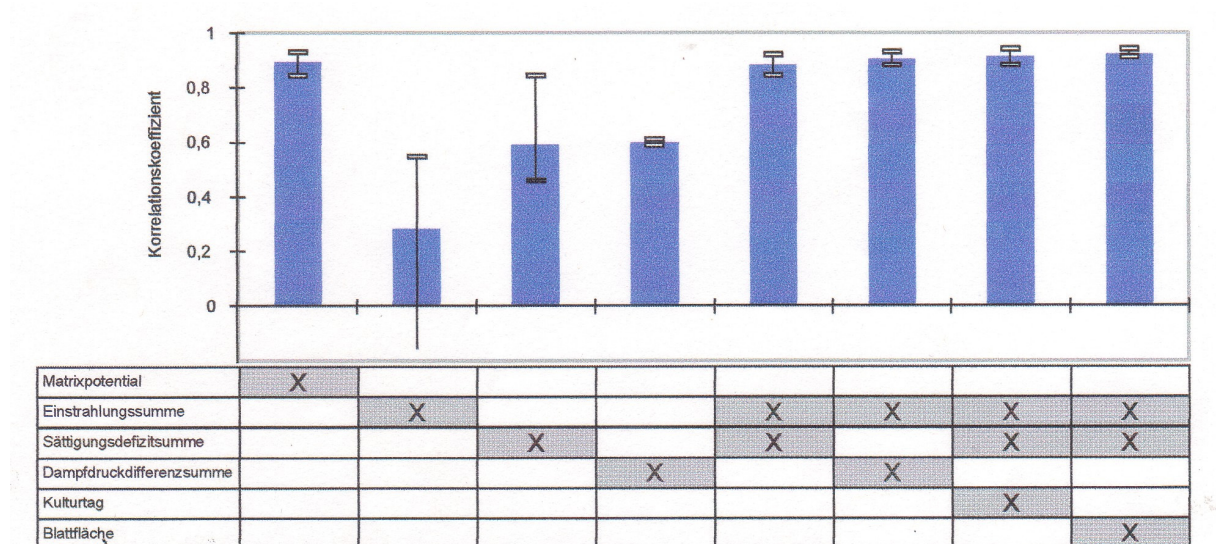


Abb. 13: Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter (Mittelwert aller Gießtakten und Gemüsearten) (BECK, 2000)

### 3.4. Bewertung der Sensoren

#### 3.4.1. Bodenfeuchtigkeitssensoren

In Anlehnung an BAILLE (1992) sind zur Auswahl und Erarbeitung der Bewässerungsstrategie folgende Schwerpunkte zu berücksichtigen:

- Auswahl des Teilsystems des Kontinuums, wo die Messung statt finden soll;
- Auswahl der zu messenden physikalische/n oder physiologische/n Größe/n;
- Auswahl der Lokalisierung des Sensors;
- Art der Verwendung der abgegebenen Informationen (direkt, indirekt) und
- Auswahl der oben genannten Schwerpunkte und deren Rangfolge.

Die präzise Steuerung der Bewässerung im intensiven Gewächshausanbau hat hohe Anforderungen an die Bodenfeuchtigkeitssensoren. Dabei ist die Ermittlung des pflanzenverfügbaren Boden- bzw. Substratwassers von größerer Bedeutung als die Ermittlung des volumetrischen Wassergehalts. Weitere Eigenschaften müssen einen Bodenfeuchtigkeitssensor charakterisieren:

- Zuverlässige Messwerte. Der Sensor soll hohe Genauigkeit und schnelle Reaktion ohne Zeitverzögerung zeigen. Die Beeinflussung des Sensors durch die Umweltbedingungen (Wind, Salzgehalt des Bodens usw.) schränkt die Glaubwürdigkeit der Messwerte ein;
- Störungsfreier Betrieb mit geringem Wartungsaufwand;
- Repräsentative Messwerte für den gesamten Bestand;
- keine Beschränkung des Sensors für Boden- und Substrattypen oder Kulturarten (gute Übertragbarkeit) und
- gutes Preis-Leistungsverhältnis

Die Messung des Boden- bzw. Substratwassers mit Hilfe der beschriebenen Sensoren (vgl. Kap. 3.1.1.) ist eine punktuelle Messung. Schwierigkeiten ergeben sich wegen der Inhomogenität des Bodens. Die Porenverteilung in der Bodenmatrix, der Mineralienanteil und weitere Eigenschaften des Bodens erschweren die Auswahl eines repräsentativen Standorts zur Platzierung des Sensors. Der Messort ist für die Funktion und die Aussagekraft der gemessenen Werte von entscheidender Bedeutung (BECK et al., 1995).

In der Praxis sind *Tensiometer* und *Tensiostaten* weit verbreitet. Die Relevanz des Messverfahrens zur Bewertung des Bodenfeuchtigkeitszustands ist ohne Zweifel. Kein anderes Messverfahren bildet den Vorgang der Wasseraufnahmerate bes-

ser ab. Auch wenn die Sensoren eng nebeneinander stehen, streuen die Messwerte deutlich. Die Empfehlung bei einer über Tensiometer geführten Tropfbewässerung wäre, den Sensor immer in die feuchteste Zone - direkt in der Tropfzone - zu platzieren (BECK et al., 1995). Kritisch ist aber die unbekannte Zeit zwischen dem Bewässerungsanfang und der Reaktion des Sensors. Daneben sind sie zerbrechlich und benötigen eine regelmäßige Kontrolle des Füllstands. Es wurde festgestellt, dass kleine Unterschiede bei den Tensiometerwerten großen Wassergehaltsunterschieden (10 %) gegenüberstehen (DA SILVA et al., 1995). Elektronische Tensiometer sind teurer und wartungsaufwendiger als Tensioschalter (BECK et al., 1995).

Die *Gipsblöcke* und *Watermarksensoren* haben eine höhere Auflösung im trockenen Bereich (PASCHOLD, 1999; LÖSCH, 2000) und einen niedrigeren Wartungsaufwand als die Tensiometer (PASCHOLD, 1999). Erst bei geringen Bodenfeuchten arbeiten sie ausreichend genau (BECK et al., 1995). Sie sind abhängig von den Alterungsprozessen, dem Salzgehalt des Bodens bzw. Substrates und der Temperatur. Sie sind nicht standardisiert, so dass Abweichungen bei Messungen unterschiedlich hergestellten Sensoren auftreten. Bei den Gipsblock-Sensoren wirkt die niedrige Haltbarkeit (Zersetzung des Sensors zum Teil innerhalb eines Jahres) kostenintensiver (PASCHOLD, 1993; HARTMANN, 1995; SOURELL et al., 1997).

Für den Praxiseinsatz sind die *TDR-Sensoren* teurer. Ihre Genauigkeit wird vom Bodenkontakt der Sonde beeinflusst. Das gleiche gilt für die *FD-Sensoren*, welche preiswerter als die TDR-Sensoren sind. Beide Messgeräte brauchen Kalibrierung, um die Beziehung der Dielektrizitätskonstante zum Wassergehalt für jedes spezifische Substrat (Boden) herzustellen. Insbesondere die auf organische Materialien basierende Substrate mit hoher Wasserbindungskapazität (z.B. Tonboden) brauchen eine Kalibrierung (ANISKO et al., 1994 in: DA SILVA et al., 1995; SCHURER et al., 1998).

Der Einsatz von *Neutronensonden* ist mit hohem apparativen Aufwand und geringer Eindringtiefe verbunden (SOURELL et al., 1997). Die Nutzung von ionisierter Strahlung erfordert Vorsichtsmaßnahmen (SOURELL et al., 1997; GIELING, 2001). Ähnliche Nachteile gelten auch für die *Gammastrahlmethode* und dem *NMR-Sensor*.



Die Bewertung der Sensoren folgt in Tab. 4. Die Anzahl der Punkte gibt Auskunft, wie das Kriterium in der Bewertung abschneidet (? = keine Angaben in der Literatur):

**Zuverlässigkeit:** • hohe Genauigkeit und keine Beeinflussung (von Umweltfaktoren u.a.), •• hohe Genauigkeit aber Beeinflussung, ••• ausreichende Genauigkeit und Beeinflussung

**Installation:** • einfach (für den Anbauer), •• mäßig, ••• schwierig

**Störung/Wartung:** • gering, •• mäßig, ••• hoch

**Übertragbarkeit:** • in allen Substraten, Böden und allen Kulturverfahren, •• in allen Substraten Böden aber nicht allen Kulturverfahren, ••• in wenigen Substraten, Böden und Kulturverfahren

Tab. 4: Bewertung der Bodenfeuchtesensoren

Messungsverfahren/ Sensor	Zuverlässigkeit	Installation	Aufwand (Störungen/Wartung)	Übertragbarkeit
<i>Saugspannung</i>				
▪ Tensiometer	•	•	••	••
▪ Tensiostat	•	•	••	••
▪ Analogtensiometer	•	•	••	••
<i>Elektrische Kapazität</i>				
▪ Gipsblock	••	•	•	••
▪ Watermark	••	•	•	••
<i>Dielektrizitätskonstante</i>				
▪ TDR	•	••	••	••
▪ FD	•	••	••	••
<i>Wärmeleitfähigkeit</i>	••	•	••	?
<i>Weitere Sensoren</i>				
▪ Hygrometer	•••	••	••	••
▪ Neutronensonde	•	•••	?	•••
▪ Gammastrahl	•	•••	?	•••
▪ NMR	•	•••	?	•••

### 3.4.2. Sensoren zur Pflanzendatenmessung

Die direkte Messung an der Pflanze bietet präzise Informationen über den Energie- und Massenfluss. Den Produzenten ist es möglich, online Informationen aus der Pflanze zu benutzen und einige der relevanten Prozesse exakt zu verfolgen. Die Mengen dieser Flüsse sind über eine kurze Zeitspanne kalkulierbar. Grundvoraussetzung der Messung von Pflanzendaten ist, dass die gewonnenen Daten vergleichbar, reproduzierbar und vor allem repräsentativ für den ganzen Pflanzenbestand sein müssen (BRAZAITYTE, 2000). Solche Sensoren sollten mit hoher Genauigkeit arbeiten und keine Interaktionen mit den Umweltfaktoren zeigen. Die geringe Wasserspeicherkapazität der Pflanze und die starke Schwankungen des Pflanzenwasserstatus in der Zeit erhöhen die Ansprüche an eine geeignete Sensortechnik. Die Bewertung der Sensoren erfolgt nach:

- der Genauigkeit (Differenzen der Wiederholungen möglichst gering),
- der Repräsentativität der Einzelmesswerte für den Bestand,
- der Robustheit der Messtechnik (einwandfreie Funktion im Gewächshaus),
- der Installation der Geräte ohne Beeinträchtigungen,
- der Dynamik der Sensortechnik (schnelle Erzeugung der Daten) und
- dem Preis-Leistungsverhältnis.

Häufig erfolgt die Messung durch invasive Sensoren, die oft die Pflanze zerstören. Auch die nicht destruktiven Sensoren können innerhalb von einigen Tagen zu einer Stressreaktion an der Pflanze - und dadurch zur Beeinträchtigung der Lebensfunktion – führen. Beachtet werden muss die nicht erwünschte eventuelle Beeinflussung der Messung durch das Gerät selbst (keine Robustheit, Schattierung der Messstelle, Temperaturerhöhungen). Mit wenigen Ausnahmen (z.B. Lysimeter, IRTs) findet jede Messung an einer zufällig ausgewählte Pflanze statt. Die aus der Datenverarbeitung gewonnenen Mittelwerte sind nicht ausreichend, um Aussagen über den gesamten Bestand herzuleiten.

Die Messmethode der Wägung (*Lysimeter*) kann auf ein, zwei Pflanzen und auf ganzen Kulturreihen durchgeführt werden. Der Vorteil der Geräte besteht in der niedrigen Wartung und den Fehlen einer Kalibrierung (EHRET et al., 2001). Sie sind glaubwürdig, messen in kurzen Intervallen - sind aber teuer (RIVIERE et al., 1999). Nachteilig wirkt die indirekte Bestimmung der Durchschnittstranspiration des Bestandes durch die Wägung des Substrates, was die Repräsentativität der Mes-

sung einschränkt. Die Messdaten der Substratfeuchte haben keine Aussagekraft für die gesamte Kultur. Obwohl die Geräte eine einfache Funktion haben, ist ihre Installation sehr aufwändig und manchmal nicht möglich (bei Kulturen mit künstlichem Stützsystem). Für einige Verfahren (Rinnen, Matten, Beeten) ist die Methode nicht geeignet. Durch die große Konstruktion (große Container) werden einige Kulturarbeiten im Gewächshaus erschwert. Um Messfehler zu vermeiden, muss die Gewichtszunahme der Pflanzen über der Kulturperiode integriert werden. Die Durchführung anderer Arbeiten oder Luftbewegungen können zu Messfehler führen.

Die Messdaten des *LVDT-Sensors* sind für Langzeitperioden nicht geeignet. Schwellungen und Schrumpfungen des Stängels werden auch durch Temperaturschwankungen verursacht. Die mikrometrische Messung der Schrumpfung und Anschwellung des Stängeldurchmessers stellt nach Ansicht von COHEN et al. (1998) einen empfindlichen Indikator für die Reaktion von Paprikapflanzen auf Umweltbedingungen dar. Zusätzlich können bestimmte Anpassungsmechanismen zum Wasserdefizit, wie osmotische Ausgleichung oder Erhöhung der Gewebeelastizität, den Stängeldurchmesser verändern (SO et al., 1979; HUGUET, 1985; TURNER, 1986 in: SIMONNEAU et al., 1993). Der Sensor ist für kleine Pflanzen nicht geeignet (RIVIERE et al., 1999). Problematisch sind auch die Handhabung, die Empfindlichkeit und der Preis dieser Geräte (PHYTECH LTD., 1998).

Langfristige Messungen mit großer Genauigkeit bietet die Methode der *Saftflussmessung*. Zur Messdurchführung sind mehrere Instrumente nötig. Der direkte Anbau des Sensors am Stängel könnte das Wachstum und/oder die täglichen Veränderungen des Stängeldiameters beeinflussen. Andererseits können Wunden am Stängel verursacht werden, wodurch eine Infektion entstehen kann (WEIBEL et al., 1995). Der mögliche Einfluss der Erhitzung des Saftflusses auf die Pflanzenkondition ist unbekannt (SHELFORD, 2000 in: EHRET, 2001). Problematisch wird die Anpassung des Sensors der nicht für alle Stängelgrößen oder Pflanzenarten geeignet ist (SWANSON, 1994; RIVIERE et al., 1999). Eine ständig gute Anpassung des Sensors am Stängel ist erforderlich (EHRET et al., 2001). Die Wärmebilanzmethode weist auf Installations-, Messungs- und Datenbearbeitungsschwierigkeiten in der Praxis hin (PHYTECH LTD., 1998).

Die Angaben aus der Literatur verweisen auf eine erforderliche Positionsänderung der Kammer oder Küvette in der *Kammer- oder Porometermethode*, um eventuelle Zerstörungen der Pflanzen oder des eingeschlossenen Blattes zu vermeiden. Langzeitmessungen an der gleichen Stelle können zur Verfälschung von tatsächlicher herrschender aerodynamischer Bedingung führen. Auf dem Markt verfügbare Porometer (ADC Parkinson, LI-COR LI-1600 series und LI-6000) verursachen im Laufe der Messungen mechanischen Stress an Teilen der Blattschicht. Wiederholte Messungen an den gleichen Blättern könnte auch die Stomataphysiologie beeinflussen (MARLER, 1992 in: PICKERING et al., 1993). Die Lichtdurchlässigkeit der Kammer oder Küvette ist reduziert, was die Genauigkeit der Messung einschränkt (PICKERING et al., 1993). Das Entstehen eines Küvettenklimas, das nicht identisch mit den außerhalb der Küvette herrschenden Bedingungen ist, ist zu verhindern.

Auf eine schnelle und glaubwürdige Messung mit einfacher Handhabung verweisen die *IRT-Sensoren*. Vorteilhaft ist auch ihre Portabilität. Durch diese Methode können plötzliche und schnelle Temperaturveränderungen abgebildet, und Messungen können an einem oder mehreren Blättern gleichzeitig durchgeführt werden. Die Methode findet keine Anwendung, wenn sich der Bestand im frühen Entwicklungsstadium befindet. Die Felder der Betrachtung und der Winkel des Sensors zur Blattoberfläche beeinflussen die Genauigkeit der Messung. Aus dem Feld der Betrachtung müssen der Himmel und der Flur des Hauses ausgeschlossen werden. Mindestens 75 % des Bodens muss bedeckt sein (PENUELAS et al., 1992; WANG et al., 1999; EHRET et al., 2001). Eine eventuelle Schattierung der gemessenen Oberfläche durch den Sensor sollte vermieden werden. RÖßLER und ROTH (1998) zeigten, dass ein Schädlingsbefall und ein differenziertes Stickstoffangebot die Messung beeinflussen. Temperaturdifferenzen werden nicht nur aus Wassermangel verursacht. Die Schließung der Stomata durch hohe Sonnenstrahlung oder hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration verursachen ebenso Differenzen. Die Ergebnisse von KARICA et al. (1999) zeigten, dass die Methode den vorgenommenen Wasserstress nicht rechtzeitig entdecken kann (3 Tage später). Fernmesssensoren sind meist teuer und nur von Experten zu verwenden.

Der *Stängelhygrometer* bietet eine weitere direkte Methode zur Messung des Wasserstatus. Das Gerät ist aber nicht für kontinuierliche Messungen geeignet. Die Instrumente brauchen Kalibrierung und sind sehr empfindlich, was mechanische

Zerstörungen und Verschmutzungsakkumulationen betrifft. Auch hier muss die Anbringungsstelle des Sensors periodisch geändert werden, um Nebenwirkungen an der Pflanze zu vermeiden (EHRET et al., 2001).

Nachteilig sind auch die Methoden der *NMR* und  $\gamma$ -Strahlen. Die Messung der *akustischen Emission* verlangt weitere Studien, da die Ursachen für dieses Phänomen noch nicht erkannt worden sind. Die Wahrscheinlichkeit der gewonnenen Informationen muss getestet werden, da die Signale von einigen Faktoren beeinflusst werden, wie Eigenschaften des Sensors, Kontaktstelle an der Pflanze usw. (OKUSHIMA et al., 1998; EHRET et al., 2001). Es muss geklärt werden, ob die akustische Emission ein Symptom der elastischen oder plastischen Dehnung ist (BORMANN et al., 2002).

Die Bewertung der Sensoren folgt in Tab. 5, nach den gleichen Bewertungskriterien wie in Tab. 4 (? = keine Angaben in der Literatur). Die Destruktivität der Sensoren wird wie folgt bewertet: • kein Eingriff an der Pflanze, •• mäßiger Eingriff, ••• hoher Eingriff.

Tab. 5: Bewertung der Sensoren zur Messung von pflanzenphysiologischen Parameter

Parameter/ Sensor	Zuverlässigkeit	Installation	Aufwand	Übertragbarkeit	Destruktivität
<u>Transpiration</u>					
▪ Lysimeter	••	•••	••	••	•
▪ Saftflussmeter	•	•••	•••	••	•••
▪ Porometer/ Kammer	••	•	••	•	•••
▪ Akustische Emission	•••	?	?	••	?
<u>Pflanzenwassergehalt</u>					
▪ Hygrometer	••	•	•••	•	•••
▪ NMR, $\gamma$ -Strahlen	•	•••	•••	•	•
<u>Organgröße</u>					
▪ LVDT	••	••	•••	••	?
<u>Temperatur</u>					
▪ IRTs	•••	•	•	•	•

### **3.5. Schlussfolgerungen aus der Bewertung der Sensoren und Modelle**

#### **3.5.1. Geeignete Messverfahren im SPAC-System**

Um im intensiven Gewächshausanbau zielbewusst handeln zu können, werden Informationen über den Zustand biologischer und physikalischer Größen benötigt. Im Rahmen der praktischen Kontrolle und Regelung der komplexen Gewächshausprozesse, werden die komplexen Beziehungen zwischen den Faktoren des Mikroklimas im Gewächshaus und den kurzfristigen Pflanzenreaktionen gemessen und modelliert. Kulturverfahren, Ausbringtechnik und Bodeneigenschaften sind bei der Erarbeitung, Weiterentwicklung und Auswahl von Steuer- und Regelverfahren zur Bewässerung und Nährstoffversorgung als Einheit zu sehen. Die Dosier- und Verteiltechnik muss soweit verbessert werden, dass diese die erreichten steuerungstechnischen Fortschritte realisieren können.

Die Auswahl des Messortes im SPAC-System hat Vor- und Nachteile (Tab. 6). Die Messung im Klima- und Bodenbereich der Pflanze ermittelt einen Teil der Pflanzenumwelt, ohne die Pflanze selbst zu berücksichtigen. Diese Methoden ermöglichen zwar die Kontrolle und Regelung des Gewächshausklimas und der Bewässerung und könnten eine Wasserstresssituation verhindern, geben aber keine Aussagen über den tatsächlichen Wasserstatus der Pflanze.

Die Erfassung des Wassergehalts und des Wasserpotenzials im Boden bzw. Substrat durch geeignete Sensoren kommt in der Praxis häufig vor. Traditionell wird die Bewässerung durch Tensiometer geregelt. Die Bodenfeuchtigkeitssensoren bieten eine direkte Erkennung der aktuellen Bodenfeuchtigkeit, die eine schnelle Kontrolle der erfolgten Bewässerung ermöglicht. Mit dem Einsatz mehrerer Sensoren sind Störungen der Wasserverteilung sofort zu erkennen. Die sensorische Messung im Boden- bzw. im Substratbereich wird jedoch durch ökonomische und technologische Restriktionen eingeschränkt. Die Messergebnisse dieser Regelverfahren orientieren sich grundsätzlich auf die Bestimmung der Bewässerungszeit, ohne den Wasserbedarf des Pflanzenbestands zu berücksichtigen.

Klimatische Parameter wie die Einstrahlung, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit können ohne besonderen technischen Aufwand über den Klimacomputer erfasst werden. Diese Messgeber sind im Gegensatz zu den anderen

---

Sensoren weniger wartungsbedürftig und stör anfällig. Die Berechnung der Wasserumsätze unter bestimmten klimatischen Bedingungen basiert auf empirisch gewonnenen Modellen. Durch die Kombination mehrerer Störgrößen kann der Wasserumsatz besser berechnet werden. Aus diesen empirischen Modellen ist es nicht möglich, einen für alle Kulturen allgemeingültigen Zusammenhang abzuleiten. Die Modellparameter sind pflanzenspezifisch und müssen an die jeweiligen Bedingungen angepasst werden (BECK, 2000).

Neue Möglichkeiten, direkte Informationen von der Pflanze über ihren momentanen Stoff- und Energieumsatz zu erhalten, bietet das *Phytomonitoring-verfahren*. Pflanzenphysiologische Reaktionen werden durch Messdaten visualisiert. Die Methode des Phytomonitoring verlangt nicht das Wissen aller Einflussfaktoren der pflanzlichen Prozesse. Die Erfassung von momentanen Werten pflanzlicher Reaktionen ermöglicht die Mengenkalkulation der Stoff- oder Energieumsätze über kurze und längere Zeiträume. Diese Technik zielt auf eine frühe und objektive Erkennung von Funktionsstörungen in den Pflanzen und auf die rechtzeitige Offenlegung von Pflanzenreaktionen hin (TON et al., 1997 in: KOPYT et al., 2001).

Tab. 6: Bewertung der Messmethoden

	<i>Regelung der Bodenfeuchte</i>	<i>Steuerung nach den Klimabedingungen</i>	<i>Steuerung nach den Pflanzenwasserumsätzen</i>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktuelle Bodenfeuchte direkt erkennbar und kontinuierliche Kontrolle des Wassergehaltes im Boden.</li> <li>• Schnelle Beobachtung und Kontrolle jedes Bewässerungstaktes</li> <li>• Niedrige Ansprüche an technisches Wissen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wenige Ansprüche an Wartung und Störungskontrolle</li> <li>• Einsatz der existierenden Klimasensoren (niedrige Kosten)</li> <li>• Niedrige Ansprüche an technisches Wissen</li> <li>• Kein besonderer Installationsaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontinuierliche Ermittlung des momentanen Wasserzustands der Pflanze</li> <li>• Präzise Messung der Transpiration möglich</li> <li>• Mengenkalkulation über kurze Zeitspanne möglich</li> <li>• Frühe Erkennung von Pflanzenstörungen</li> <li>• Schnelle Kontrolle der Reaktion des Produzenten bei Stresssituationen</li> <li>• Hohe Messgenauigkeit und –geschwindigkeit</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Aussage über die Wasserkondition der Pflanze, d.h. die Bestimmung der Bewässerungsmenge ist nicht möglich</li> <li>• Repräsentativer Standort schwer zu bestimmen. Übertragbarkeit auf Bestandsbedingungen schwierig</li> <li>• Zeitdifferenz zwischen der Sensoranzeige und der tatsächlichen Bodenfeuchte (Dynamik)</li> <li>• Umweltbedingungen und Kulturarbeiten können die Genauigkeit der Messwerte beeinflussen</li> <li>• Installationsschwierigkeiten</li> <li>• Nicht bei allen Kulturverfahren einsetzbar</li> <li>• Niedriges Preis/Leistungsverhältnis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Aussage über die Wasserkondition der Pflanze</li> <li>• Keine Aussage über den Wassergehalt des Bodens</li> <li>• Die gewonnenen Daten sind pflanzenspezifisch für die herrschenden Klimabedingungen</li> <li>• Gute Korrelation zum Wasserumsatz nur bei Kombination mehrerer Klimafaktoren (hohe Ansprüche an Modellierung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusätzliche Sensorik wird erfordert – Niedriges Preis/Leistungsverhältnis</li> <li>• Die punktuelle Messung erschwert die Übertragbarkeit der Daten auf Bestandesbedingungen</li> <li>• Zusätzlicher Arbeitsaufwand (Pflege, Kontrolle)</li> <li>• Nicht bei allen Kulturarten oder –verfahren einsetzbar</li> <li>• Keine Aussagen über den Wassergehalt des Bodens</li> <li>• Installationsschwierigkeiten</li> <li>• Erschwert die Kulturarbeiten im Raum</li> </ul>



### **3.5.2. Modellierungsansprüche zur exakten Bestimmung des Wasserumsatzes**

Sollten Modelle zur Steuerung der Bewässerung eingesetzt werden, müssen sie für den Anbauer verständlich, einfach zu handhaben und anpassungsfähig an Benutzerwünsche und an das sich veränderte Realsystem sein. In den Kontrollstrategien werden einfache, robuste und universelle Modelle gebraucht (BAILEY et al., 1999). Besonders die „Black Box“ Modelle verlangen ein sehr hohes Niveau an Wissen, obwohl sie eine objektive Annäherung bieten (Anlehnung an gemessenen Daten). Die Bewertung dieser Modelle ist schwierig, weil sie keinerlei Begründung für ihr Verhalten liefern, was zu Akzeptanzproblemen beim Anwender führt, der dem Modell vertrauen soll (FICK et al., 2000).

In den Modellen werden die Differenzen zwischen den einzelnen Pflanzen oder Pflanzenarten, wie auch den klimatischen Unterschieden, nicht berücksichtigt. Die getroffenen Aussagen erheben Anspruch auf Allgemeingültigkeit für den gesamten Bestand, die nicht nachvollziehbar sind. Man sollte so modellieren, dass die Modelle auf andere Pflanzen und unter anderen Klimabedingungen anpassungsfähig sind.

Die Anzahl der Modellparameter ist begrenzt, so dass nie alle Einflussgrößen berücksichtigt werden können. Je mehr Inputdaten ein Modell besitzt, desto sensibler wird es. Weiterhin sind die kurzfristigen (Tagesbasis) und langfristigen (im Laufe der Kulturentwicklung) Veränderungen der Wirkung der einzelnen Modellparameter zu berücksichtigen. Häufig werden im Modellbildungsprozess die realen Gegebenheiten vereinfacht, dass die Validität des Modells zweifelhaft macht. Oft müssen Parameter und Anfangsbedingungen geschätzt werden, wobei zu beachten ist, dass durch kleine Veränderungen der Werte, bei nicht linearen Systemen, große Unterschiede im Ergebnis auftreten können (HOLTZ, 2001).

Die Entwicklung einer Modelltechnik ist vom Ziel des entsprechenden Modells stark beeinflusst. Um ein hohes Niveau im Kontrollsystem zu erreichen, ist ein höheres Niveau an Informationstechnologie und an Automatisierung erforderlich (MURASE, 2000). Abb. 14 beschreibt die Abhängigkeit der Modellfunktion vom Modellniveau:

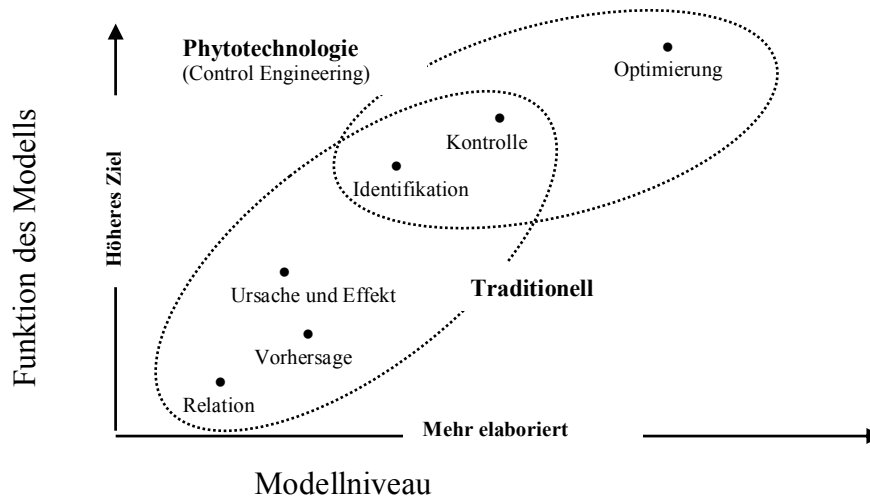


Abb. 14: Mehr elaborierte Modelle sind erforderlich, um ein höheres Niveau der Modellfunktion zu erreichen (MURASE, 2000)

Die korrelationsbasierende Transpirationsmodellierung aus den Einstrahlungsbedingungen ist für kurzzeitige Vorhersagen nicht geeignet. Bei plötzlichen Änderungen der Klimabedingungen zeigen sie niedrige Sensibilität. Die Einstrahlung wird meist außerhalb des Gewächshauses über einen Sensor für den ganzen Betrieb erfasst. Unterschiedliche Einflüsse der einzelnen Gewächshausabteile (Lüftung, Heizung usw.) werden dadurch nicht berücksichtigt. Unberücksichtigt wird ebenso die Transpiration der Nachtperiode (BECK 2000). Die Einbeziehung weiterer Parameter (VPD, Lufttemperatur u.a.) verbessert zwar die Modellfunktion (BECK, 2000), aber wegen zusätzlichen Messungen erhöht sich der Aufwand und die Handhabung des Modells wird für den Anbauer komplizierter.

Die genaue Ermittlung der in Transpirationsmodellen einbezogenen pflanzlichen Widerstände ist zweifelhaft. Die Berechnung der Widerstände basiert meistens auf empirisch gewonnenen Modellen.

---

## 4. PHYTOMONITORING UND BEWÄSSERUNG NACH BESTANDS- TRANSPIRATIONSSUMMEN

### 4.1. Ableitung des Vorhabens

Es gibt derzeit keine Methode, mit der die Bestimmung des Wasserumsatzes in Pflanzenbeständen so präzise erfolgt, dass ein eingriffsfreier automatischer Betrieb einer Bewässerungsanlage über längere Zeitabschnitte möglich ist. Besonders in Perioden extrem hoher Einstrahlung und den daraus folgenden erhöhten Wasserumsätzen ist eine bedarfsgerechte Bewässerung ohne Überschuss kaum möglich.

Dementsprechend werden aus Sicherheitsgründen Bewässerungssysteme mit Überschuss betrieben, was zu den bekannten ökonomischen und ökologischen Nachteilen führt.

Auch bei geschlossenen Verfahren der Nährlösungsrezirkulation ist die Bestimmung der Wasserumsätze wichtig, um eine exakte Dosierung der Nährlösungskomponenten vornehmen zu können.

Mit der *Phytomonitoringtechnologie* bzw. mit Ansätzen wie dem „Speaking Plant“-Konzept soll versucht werden, durch direkte Messung an der Pflanze, Informationen über den Stoff- und Wasserumsatz zu bekommen.

Auf Grund der komplexen Beziehungen zwischen den Stell- und Störgrößen im Gewächshaus und pflanzenphysiologischen Abläufen sind prädiktive Modelle zur Steuerung der Pflanzenversorgung sehr aufwendig und stark von den speziellen Bedingungen abhängig. Die Integration gemessener Zustandswerte des Pflanzenbestands in vorhandene Modelle bzw. die Erfassung von Stoffströmen mittels Sensoren ergeben neue Möglichkeiten zur Bewässerungssteuerung.

Eine interessante Alternative stellen Kombinationsmethoden, wie sie von BECK (2000) aufgezeigt wurden, dar. Dabei werden entweder Klimamodelle durch online-Messungen adaptiert oder es werden Sensoren durch gleichzeitig stattfindende Modellierungsberechnungen überwacht. In jedem Fall müssen für diese Zwecke die Unsicherheiten des Modells und der direkten Messung abgeschätzt werden.

Die gemessenen Pflanzendaten können, als Rückkopplung der automatischen Adaption von Modellen, in dem Steuerungsalgorithmus eingesetzt werden (BAILEY et al., 1999). Dieser wird ebenso stark von den Bodenfeuchtheitsmessungen

unterstützt. Forschungsergebnisse zeigen, dass Bodenfeuchtigkeitszustand, Blatt-temperatur und Transpirationsrate miteinander verknüpft sind (QIU et al., 2000).

Plausibilität und Präzision der Informationsgewinnung und der Mengenkalkulation im Bestandesniveau sind Voraussetzung für eine akkurate Wasserbilanzbildung.

#### **4.2. Versuchsziel**

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist, anhand von direkten Messungen an Pflanzen oder Pflanzenteilen eine neue Steuerungsmethode zur Bewässerung von gartenbaulichen Kulturen zu entwickeln. Zur Erreichung dieses Zieles werden die folgenden Teilaspekte unter Versuch gestellt:

- ▶ Test von Sensoren zur Messung von Wasserumsätzen in Pflanzenbeständen:
  - Tensiometrie,
  - Gaswechsellmessung,
  - Saftstrommessung.
- ▶ Erfassung von Transpirationssummen in Pflanzenbeständen mit Hilfe der Gaswechsellmessung an einer Vielfalt von Kulturen mit hohen Wasserumsätzen (Gemüse- und Zierpflanzen) und auf Substraten mit unterschiedlichem Pufferungsvermögen:
  - Erstellung von Wasserbilanzen an offenen hydroponischen Systemen,
  - Erstellung der Wasserbilanz eines offenen hydroponischen Systems unter hohen Einstrahlungsbedingungen.
- ▶ Automatische Bewässerungssteuerung mit gemessenen Transpirationssummen bei hohen Wasserumsätzen:
  - Steuerung der Bewässerung mit definiertem Überschuss,
  - Steuerung der Bewässerung ohne Überschuss.
- ▶ Analysen zur Stickstoffdynamik im Substrat und im Überschusswasser der transpirationssummengesteuerten Bewässerung ohne Drainage.
- ▶ Überprüfung des effizienten Wassereinsatzes in der neuen Steuerungsmethode.

### 4.3. Material und Methoden

#### 4.3.1. Auswahl der Messverfahren zur Erfassung von Wasserbilanzen

##### ➤ Tensiometrie

Das Tensiometer „T3“ der Fa. UMS wurde zur Messung der Saugspannung im Substrat, wie auch zur Bewässerungsregelung, eingesetzt. Es sind elektronische Druckaufnehmertensiometer, die das Wasserpotenzial im Substrat über Diaphragma, Wasser und Druckumformer messen.

Der Kerzendurchmesser beträgt ca. 20 mm und die Kerzenlänge ca. 50 mm. Der Messkopf hat eine Höhe von ca. 40 mm und einen unteren Durchmesser von 14 mm. Das Tensiometer „T3“ hat einen Messbereich von 0 bis 850 hPa = pF 2,9 - abzüglich Schaftlänge (1 cm = 1 hPa) (Tab. 29, Abb. 67 b)).

Die Sensoren wurden über die potentialfreien Eingänge (acht) des PTF-Messgerätes an der Ringleitung angeschlossen (Abb. 20).

##### ➤ Saftstrommessung

Der *LPS-05MD Phytomonitor* wurde von der Fa. PHYTECH Ltd. entwickelt. Das Gerät beinhaltet verschiedene Sensoren zur Ermittlung wichtiger Pflanzendaten. Folgende Pflanzendaten und andere Messgrößen können durch die Sensoren erfasst werden:

- Lufttemperatur und Luftfeuchte,
- Grenzschichtwiderstand,
- Fruchtwachstum,
- Blatt- und Fruchttemperatur,
- Blütentemperatur,
- Stängeldurchmesser,
- Substratfeuchte und Substrattemperatur.

Die Sensoren SF-4 und SF-5 wurden entwickelt, um eine kontinuierliche Messung der Saftflussratevariationen in den axialen Organen der Pflanze zu ermöglichen (Tab. 31, Abb. 68). Ihre Funktion basiert auf dem Prinzip der Wärmebilanzmessung des Saftstroms (Abb. 15).

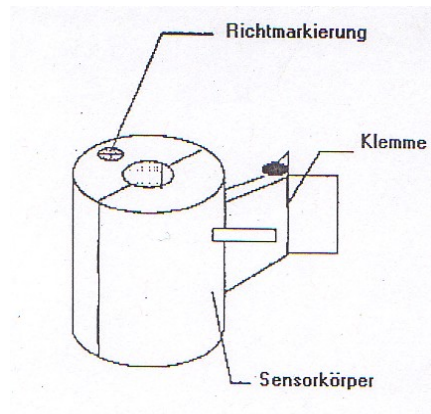


Abb. 15: Generelle Ansicht der SF-Stängelflussensoren (PHYTECH Ltd., 1998)

Ein kleiner Heizapparat erwärmt einen Teil des Stängels auf 2-3°C über der Umgebungstemperatur. Bei gleichem Abstand über und unter dem Heizapparat wird die Temperatur gemessen (Thermoelemente). Wenn kein Fluss im Stängel existiert, erfolgt eine symmetrische Temperaturverteilung und der Output des Thermoelements ist fast Null. Aus dem nach oben gerichteten Xylemfluss resultiert eine Temperaturerhöhung und aus dem entgegengesetzten Fluss eine Temperaturminderung. Der Output des Sensors folgt diesem Temperaturgradienten.

#### ➤ Gaswechselformung

Im Wissenschaftsbereich Gartenbautechnik der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg wurde ein Porometer zur Transpirationsmassenstrommessung entwickelt: der Plantputer-Phytomonitor „EPM“. Das Messprinzip basiert auf einer offenen Gaswechselformung mit Hilfe von Blattküvetten. Mit dem Messgerät besteht die Möglichkeit, die Mikroklimadaten im Pflanzenbestand (Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>-Gehalt) sowie Momentanwerte der pflanzlichen Transpiration einzelner Blätter, online zu bestimmen (FÖRTSCH und SCHMIDT, 1990). Es werden physiologische Größen im zeitlichen Raster von 1 s erfasst. Dabei wird bei mehreren Pflanzen gleichzeitig gemessen. Zur Messung kommen mehrere Pflanzenblätter (acht) in Betracht. Die Geräte „EPM 2005“ und „EPM 2006“ unterscheiden sich durch die jeweilige Gasführung.

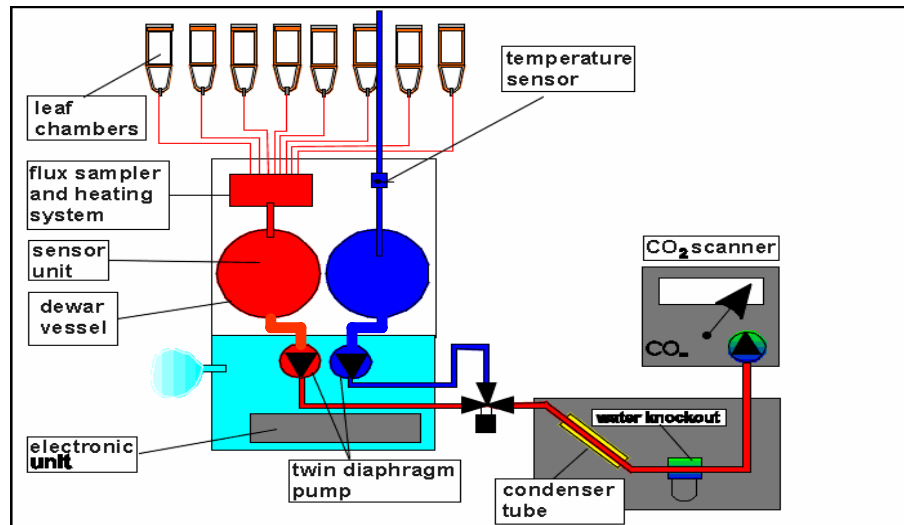


Abb. 16: Technische und sensorische Ausstattung des Plantputer-Phytomonitor „EPM 2005“ (IBS, 2003)

Im „EPM 2005“ (Abb. 16) werden durch die Doppelmembranpumpe in den Dewargefäßen Unterdrücke erzeugt, die zum Antrieb zweier Luftströme dienen. Der erste Luftstrom wird durch die acht Küvetten, die mit flexiblen Schlauchleitungen am Zentralgehäuse angeschlossen sind, gesaugt und im ersten Gefäß vermischt. Der zweite Luftstrom wird aus der Umgebungsluft gesaugt. Aus der gemessenen Feuchtdifferenz wird die von der Blattoberfläche abgegebene Wasserdampfmenge (Transpirationsmenge) berechnet. Die Transpirationsrate der eingeschlossenen Blätter  $m_t$  wird aus der Förderleistung der Pumpe  $m_l$ , der Luftdichte  $\rho_l$ , die in den Küvetten eingeschlossene Blattfläche  $F_k$  und der Differenz der absoluten Feuchte der Küvettenluft  $x_k$ , sowie der Referenzluft  $x_r$ , berechnet:

$$m_t = m_l \cdot \rho_l \cdot (x_k - x_r) / F_k \quad (37)$$

Aus der Gl. 37 ist zu ersehen, dass durch Erhöhung der in den Küvetten eingeschlossenen Blattflächen oder durch Minderung der Pumpenförderleistung die Auflösung der Messung erhöht werden kann. Dabei kann es bei hoch transpirierenden Pflanzen zu Kondensationsbildungen in den Küvetten oder in der Dewarkammer kommen. In solchen Fällen ist die Einschränkung der gemessenen Flächengröße, wie auch die Erhöhung der Gasströmungsgeschwindigkeit, vorteilhaft. Beim Einsatz verschiedener Blattküvetten mit unterschiedlicher Gasströmung können weniger Küvetten am Messgerät angeschlossen werden (d.h. mehr Luftströ-

mung durch weniger Küvetten und eingeschränkter Blattfläche). Bei konstant bleibender Pumpenförderleistung ist die Anzahl der angeschlossenen Küvetten wichtig für die Berechnung der Messfläche (SCHMIDT, 1998).

Um bei hoher relativer Feuchtigkeit (über 95 %) die Kondensationsbildung am kapazitiven Feuchtesensor auszuschließen, werden die Messgasströme im Gerät aufgeheizt. Die Luftströme werden vor dem Ansaugen oder auf dem Weg zur Dewarkammer erwärmt.

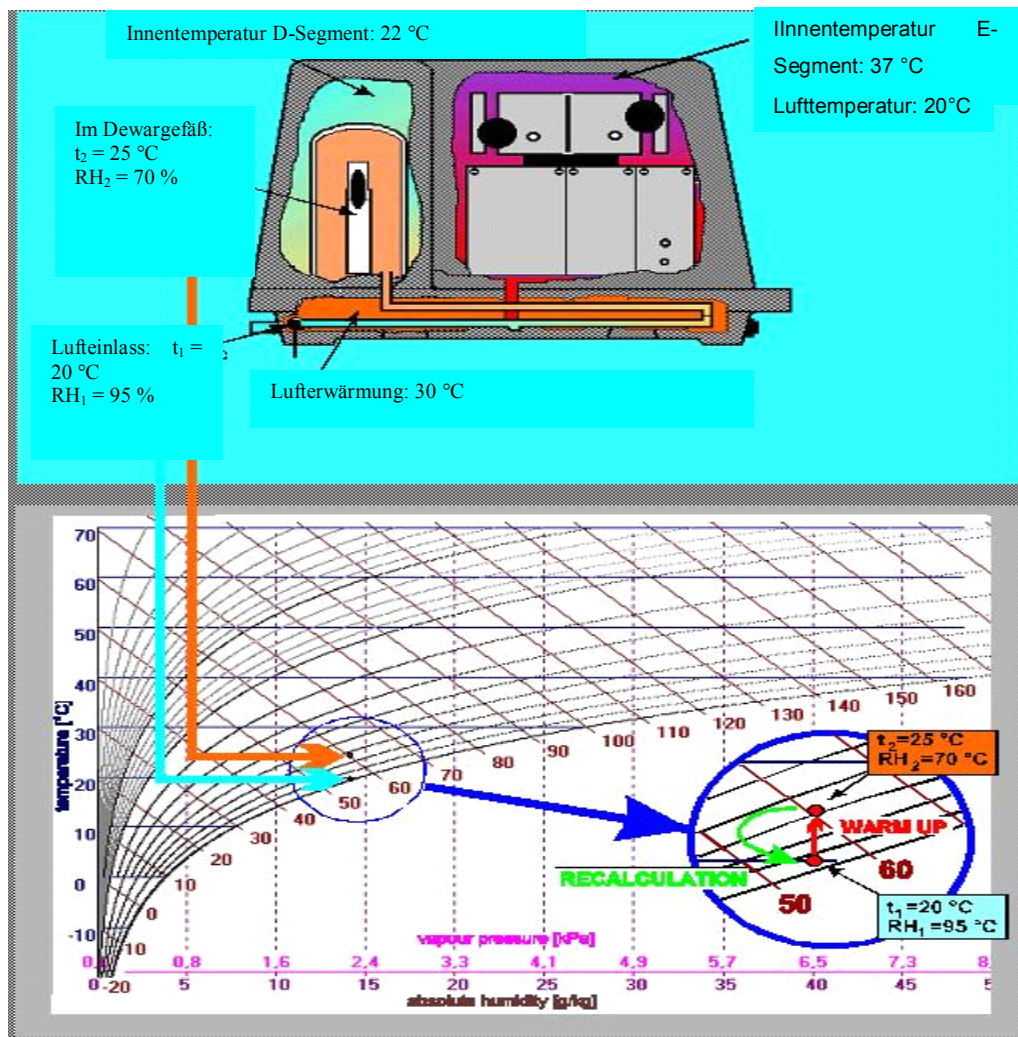


Abb. 17: Entweichung der Kondensationsbildung im Gaswechsellmessgerät durch Erwärmung der Referenzluft auf dem Weg zur Dewarkammer - Graphische Erklärung im h,x- Mollier Diagramm (SCHMIDT, 1998)

Durch die Erwärmung des Luftstroms wird die relative Feuchte des Messgasstroms abgesunken, ohne die absolute Feuchte zu verändern. Bei gleich bleibender absoluter Luftfeuchte nimmt die relative Luftfeuchte ab. Über die



Erfassung der Lufttemperatur vor und nach der Erwärmung kann die relative Feuchte des Luftstromes wie folgt zurückberechnet werden (Abb. 17):

$$rh_{cor} = rh_{mess} * p_s(t_1) / p_s(t_2) \quad (38)$$

Somit können die Luftströmungen (Referenz- und Küvettenluft) im Bereich zwischen 0 % und 85 % aufgezeichnet werden (SCHMIDT, 1998).

Die Gasströme werden nach der Feuchtedifferenzmessung zu einem optoakustischen Gassensor (Fa. Siemens) geleitet, der die CO<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenz der beiden Gasströme ermittelt. Aus dieser Differenz kann die Photosynthese- bzw. Atmungsrate bestimmt werden. Problematisch wird die gleichzeitige Messung der Transpiration und der Photosynthese. Um eine hohe Auflösung der CO<sub>2</sub>-Differenzen zwischen dem Küvetten- und Referenzluftstrom zu erreichen, sollte die Pumpenförderungsleistung niedrig bleiben. Bei zu geringen Förderleistungen kann der in den Blatküvetten entstehende Wasserdampf jedoch nicht abtransportiert werden. Es kommt zur Kondensation. Auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Blatküvetten steigt erheblich an, und führt zur Verfälschung der Messergebnisse. Für eine Küvettenmessfläche von 360 cm<sup>2</sup> (8 Küvetten) wurde eine Luftstromgeschwindigkeit zwischen 90 und 110 cm<sup>3</sup>/s als optimal ermittelt (Abb. 18).

**Diagramm Optimierung der Luftströme**

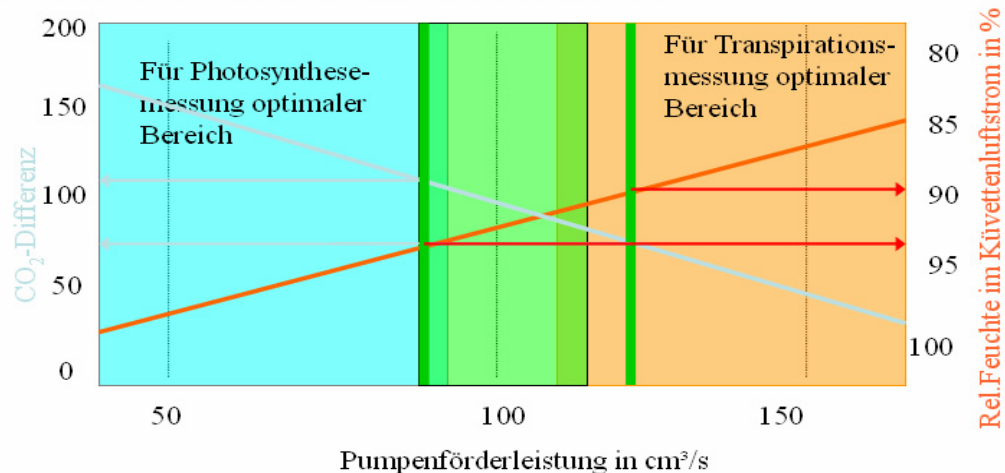


Abb. 18: Optimale Luftstromgeschwindigkeit im EPM 2006 bei einer Küvettenmessfläche von 360 cm<sup>2</sup>

Im Einkanalmessverfahren (Abb. 19) wird durch das Umschalten der Ventilpumpe abwechselnd Küvettenluft und Referenzluft in die Dewarkammer geleitet. Mit Hilfe der in den Dewargefäßen vorhandenen Sensoren wird der Wasserdampfgehalt der beiden Luftströme bestimmt. Dadurch können systematische Messabweichungen zwischen den Sensorblöcken vermieden werden, die sonst oft eine Nullpunktkontrolle erfordern.

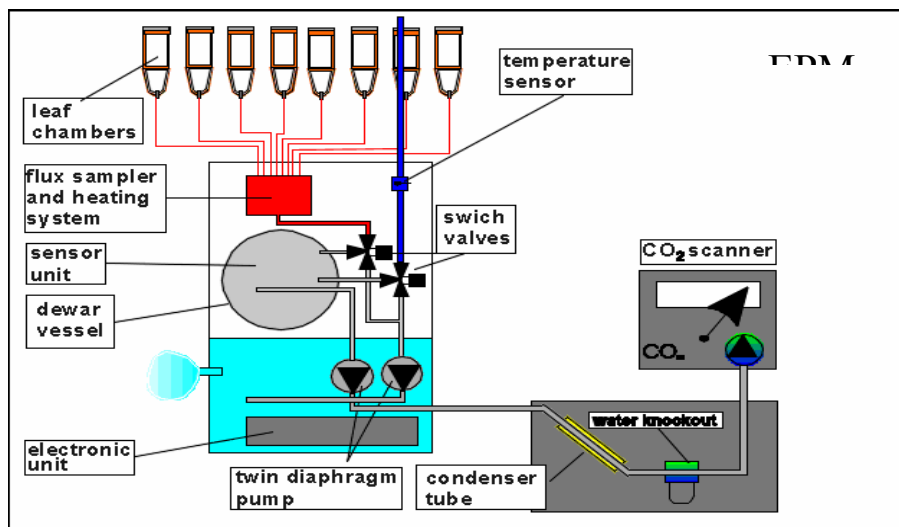


Abb. 19: Technische und sensorische Ausstattung des Plantputer-Phytomonitor „EPM 2006“ (IBS, 2003)

Eine weitere Ausführung des Messgerätes, mit einem integrierten CO<sub>2</sub>-Miniatursensor, kann zusätzlich zur Gaswechsellmessung auch Messungen der Photosynthese und Atmung vornehmen.

Folgende Messwerte (Ausgangsparameter) werden als Momentanwerte erfasst oder aus der Datenverarbeitung mittels Modelle berechnet:

- Aktuelle Transpirationsmenge einer Pflanze bzw. die mittlere Transpirationsmenge eines Bestands,
- Temperatur einer Pflanze bzw. eines Bestands,
- Dampfdruckdifferenz,
- Stomataleitwert,
- Aktuelle Nettophotosyntheseleistung,
- Aktuelle Atmungsrate und
- Dampfkonzentrationsdifferenz.

#### 4.3.2. Versuchsort

Die Versuche wurden am Institut für Gartenbauwissenschaften - Fachgebiet Technik im Gartenbau der Humboldt Universität zu Berlin - durchgeführt. Es wurde eine 200 m<sup>2</sup> Gewächshauskabine mit Doppelverglasung, Pflanzentische (16 m<sup>2</sup>) mit Unter-tischheizung und einem frei programmierbaren Automatisierungssystem zur Einbindung des Phytomonitorings benötigt. Die Klimasteuerung erfolgte automatisch nach dem „Plantputer“-Prozessleitsystem von SCHMIDT (1996).

Zur Erprobung der Gaswechsellmessmethode unter mediterranen Klimabedingungen wurden Versuche in einer mit Glas bedeckten 70 m<sup>2</sup> Gewächshauskabine am Versuchsstandort der Aristoteles-Universität zu Thessaloniki (Griechenland) durchgeführt. Es wurden Pflanzentische (3,8 m<sup>2</sup>) mit separaten Druckstationen benutzt. Die Klimasteuerung erfolgte über ein Computerprogramm. Zur Ventilation der Kabine diente eine Mattenkühlung.

#### 4.3.3. Technischer Aufbau der Versuchstation in Berlin

Eine *Wetterstation*, die direkt mit dem Prozessrechner in Verbindung stand, diente zur Messung der klimatischen Bedingungen außerhalb des Gewächshauses: der Luftfeuchte, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Einstrahlung usw. (Abb. 20).

Zur Bestimmung der Pflanzentemperatur aus den Energieströmen wurde die Globalstrahlung gemessen. Dazu diente das *Pyranometer* CM 5 bzw. CM 6 der Fa. KIPP und ZONEN, das am EPM-Messgerät angeschlossen wurde (Abb. 20 und 66).

Zur Ermittlung der im Gewächshaus herrschenden Luftfeuchte und -temperatur wurde das *P-TF 30 Messgerät* der Fa. POSITRONIK in unmittelbarer Nähe der Pflanzen (ca. 20-30 cm über den Pflanzenbestand) eingerichtet (Abb. 63). Das Messgerät besitzt in einem belüfteten Kanal einen Molybdänfühler zur Temperaturmessung (°C) und einen kapazitiven Luftfeuchtesensor (%). Der Sensor wurde direkt an der Ringleitung angeschlossen (Abb. 20).

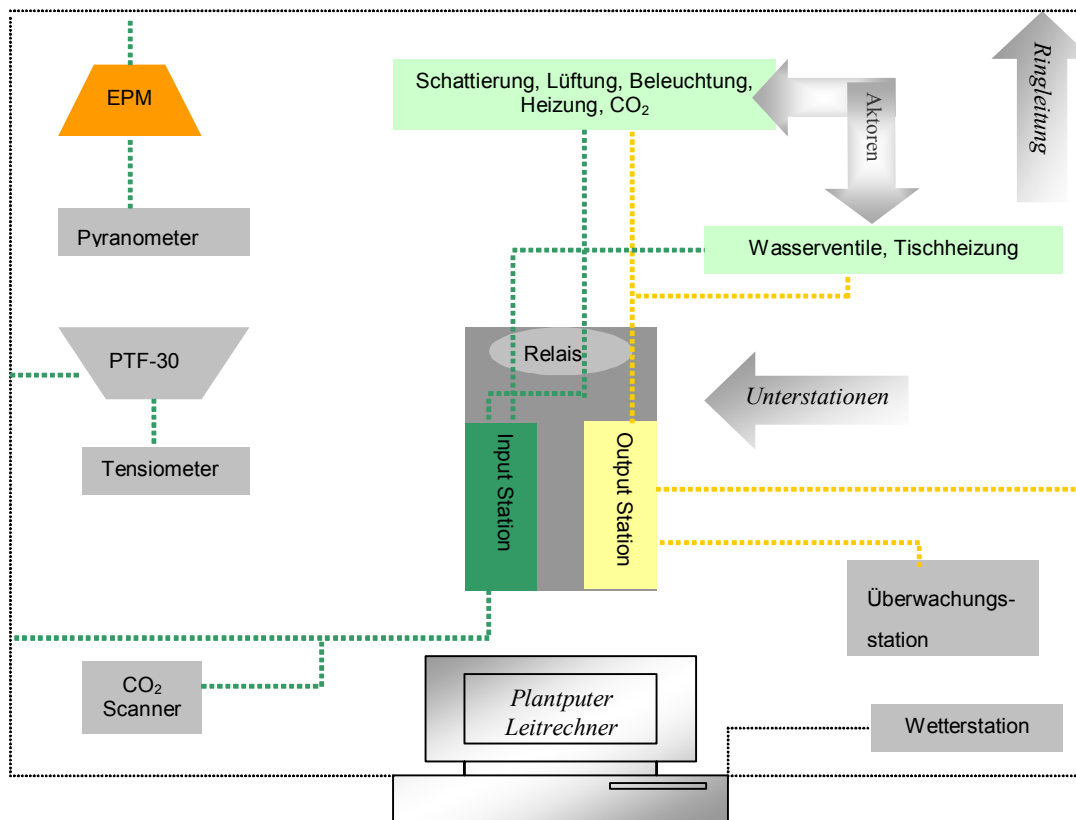


Abb. 20: Aufbau der Messtechnik in der Versuchsstation-Berlin

Das System der Klima- und Bewässerungsteuerung ist nach dem Prinzip des Leitrechners (Prozessrechner) aufgebaut. Durch Nutzung eines leistungsfähigen Rechners und durch Aufgaben-Splitting durch Multitasking, wird die Koordination zwischen Klima- und Bewässerungsteuerung erreicht.

Daten werden kontinuierlich von Messsensoren erfasst und zu einer sich im Gewächshaus befindenden, Input-Multiplexer-Station (I-Unterstation) weitergeleitet. Die Input-Station beinhaltet eine Analogmesskarte (P-AM-08), die aus einem 10 bit A/D-Wandler mit 8 Kanalschaltungen besteht. An jeder Station können bis zu 8 Messwertgeber angeschlossen werden. Die Stellbefehle werden über eine Output-Multiplexer-Station (O-Unterstation) übernommen, welche Laufzeitroutinen selbstständig ausführen können. Durch diese Hardwarekonfiguration wird einerseits der Verkabelungsaufwand minimiert (kurze Kabelwege zwischen Sensoren und Unterstationen) und andererseits der Prozessrechner von zeitaufwendigen Routinen entlastet. Die Datenübertragung zwischen den Sensoren, dem Prozessrechner und den Aktoren (z.B. Ventile) erfolgt über eine Zweidrahtleitung (Ringleitung). An den

Unterstationen kann jeder Kanal manuell ein- oder ausgeschaltet werden.

Ein Sicherheitsmodul zur Selbstkontrolle des Leitsystems ist direkt in die Ringleitung eingeschaltet und in der Nähe des Rechners angebracht. Das Modul besteht aus einer Warnkarte, die zur Überwachung der Versorgungsspannung, der Funktionsfähigkeit des Leitrechners und von vier wahlweise belegbaren Digital-eingängen dient. Stellt sich eine Störung ein, so kommt es zu einem Alarm, der sich durch das Ausschalten der blinkenden Leuchtdioden an der Warnkarte bemerkbar macht (Abb. 20).

#### **4.4. Sensortest zur Messung von Wasserumsätzen**

##### **4.4.1. Räumliche und zeitliche Repräsentativität der Saugspannungsmesswerte**

Die Aussagekraft der mit Hilfe der Tensiometer erfasste Saugspannung über den Wasserzustand eines gesamten Bestands wurde durch Langzeitbeobachtungen der Substratsaugspannung getestet. Stark transpirierende Kulturen, auch unter hohen Einstrahlungsbedingungen, wurden unter Versuch gestellt.

*Capsicum annum*, Sorte „Delgado“, wurden als Dünnschichtkultur (Einheitserde ED 73) auf zwei Betontische angebaut. Drei Kunststoffrinnen (4,5 m x 0,3 m) wurden auf jedem Tisch verlegt. Pro Rinne wurden 14 Pflanzen in einer Dichte von 10,2 Pfl./m<sup>2</sup> gepflanzt (Tab. 22, Abb. 62). Zur Erfassung der Saugspannung wurden auf den Tischen jeweils zwei Analogtensiometer eingesetzt. Als Schaltgrenzen für die Bewässerungsregelung wurden praxisüblich 50 bzw. 60 hPa eingestellt. Mit Hilfe der digitalen Messwerterfassung konnte der Saugspannungsverlauf der zwei Messstandorte dargestellt werden. Aus den aufgezeichneten Saugspannungsverläufen (Abb. 21) war festzustellen, dass sich die Saugspannung in zwei Standorten des Substrats unterscheidet, obwohl gleichmäßig bewässert wurde. Die Bewässerungsführung übernahm auf der 50 hPa-Variante das Tensiometer „8“ und entsprechend auf der 60 hPa-Variante das Tensiometer „5“. Das Substrat der Kulturrinnen, auf den sich Tensiometer „7“ und „6“ befanden, war eindeutig feuchter als in den restlichen Rinnen.

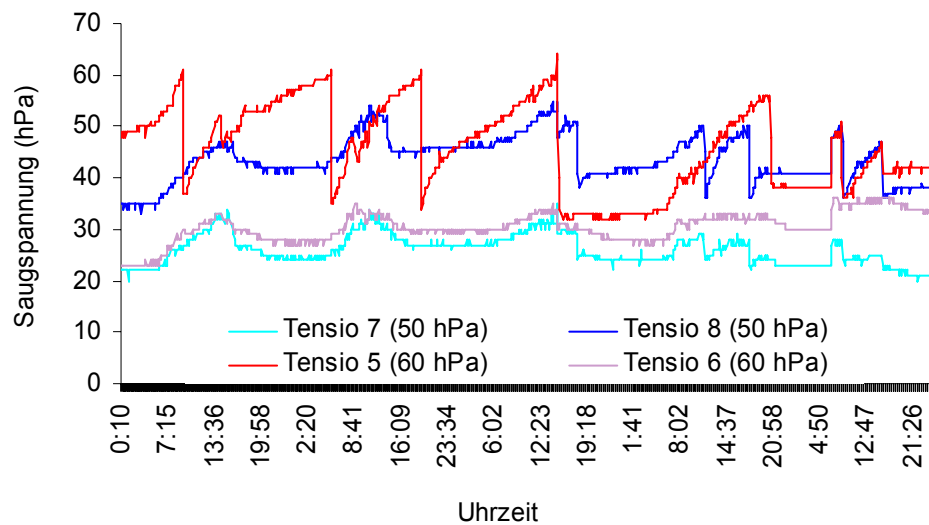


Abb. 21: Abweichungen zwischen einzelnen Tensiometer bei 50 und 60 hPa-Steuerung bei *Capsicum annuum*

*Lycopersicon esculentum*, Sorte „Rondello“, wurden in mit Einheitserde (ED 73) gefüllten Containern auf zwei Tischen kultiviert. 36 Pflanzen wurden in zwei Reihen pro Tisch in einer Dichte von 2,2 Pfl./m<sup>2</sup> aufgestellt (Tab. 23). Über vier Analogtensiometer wurde der Bewässerungsvorgang bei 50 hPa gestartet. Es wurde nach dem Mittelwert aller Saugspannungswerte bewässert. Aus den einzelnen Messwerten wurde der Verlauf an unterschiedlichen Messstandorten dargestellt.

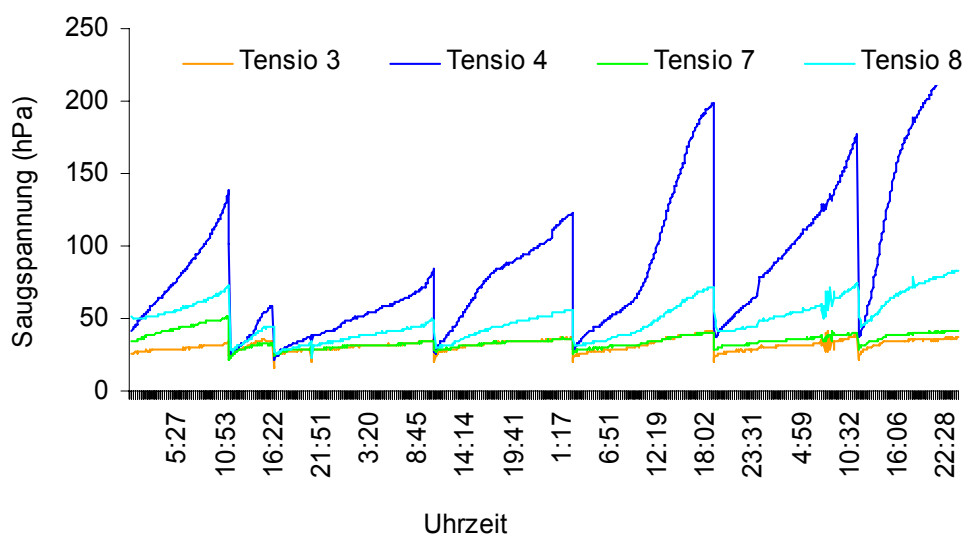


Abb. 22: Abweichungen der Saugspannung bei einer saugspannungsgeregelten Bewässerung (50 hPa) - *Lycopersicon esculentum*

Bei den Versuchen wurden teilweise drastische Abweichungen zwischen den Messwerten der einzelnen Tensiometer registriert (Abb. 22). Insbesondere der aus Tensiometer „4“ aufgezeichnete Saugspannungsverlauf bewegte sich in einem sehr trockenen Bereich. Die Saugspannung dieser Messstelle überschreitet die 200 hPa-Grenze, während bei gleicher Wasserversorgung an den Messstellen „3“, „7“ und „8“ moderate Versorgungszustände registriert wurden.

Tomatenpflanzen wurden nach dem gleichen Verfahren wie zuvor und unter hohen Einstrahlungsbedingungen unter Versuch gestellt. Die Bewässerung erfolgte bei einer Schaltschwelle von 50 hPa, als Mittelwert der Messwerte aus den drei zur Verfügung stehenden Tensiometer.

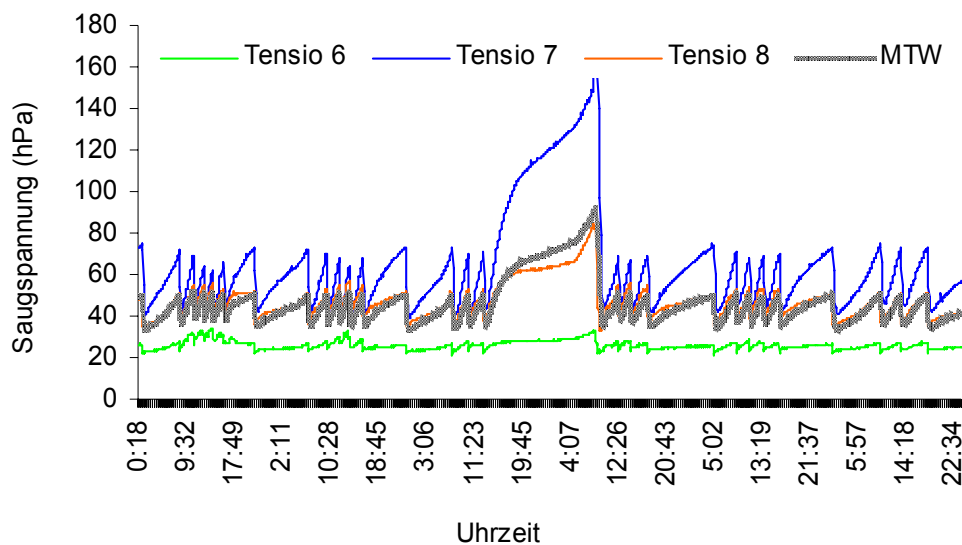


Abb. 23: Abweichungen der Saugspannung in einer einstrahlungsreichen Periode bei einer saugspannungsgeregelten Bewässerung (50 hPa) - *Lycopersicon esculentum*

Die durchschnittliche Saugspannung verlief in der vorbestimmten Schaltschwelle von 50 hPa. Die Saugspannung des Messstandorts von Tensiometer „7“ hielt sich in einem trockneren Bereich als die der Messstelle von Tensiometer „8“. Im Gegensatz dazu herrschte Nässe im Messstandort des Tensiometer „6“ (Abb. 23).

#### 4.4.2. Erfassungsgenauigkeit von Verdunstungsmengen der Gaswechselmethode

Die Messunsicherheit des Gaswechsellmessgerätes „EPM“ wurde getestet. Zur Bestimmung des aus einer Messung resultierenden Messfehlers wurden zwei Kalibrierungsmethoden durchgeführt. Der systematische Fehler wurde durch *Verdunstungstests* (messen und kumulieren der Verdunstung von definierten Wassermengen) erfasst. Die Verteilung der Transpirationsleistung an unterschiedlichen Messstellen (zufälliger Fehler) wurde durch eine Vergleichsmessung mit zwei Geräteeinheiten und je 8 Messstellen bestimmt.

##### *Systematischer Fehler:*

Der systematische Messfehler der offenen Gaswechsellmessung wurde durch „Phantommessungen“ getestet. Als Prüflinge wurden mit definierten Wassermengen befeuchtete Fließpapierblätter verwendet. Diese wurden mit einer vorbestimmten Wassermenge mittels Tropfpipette befeuchtet und anschließend in die Küvetten eingelegt. Die Verdunstungsmassenstromdichte der Prüflinge wurde im Sekundenabstand gemessen und als Mittelwert aller 8 Blattküvetten gespeichert.

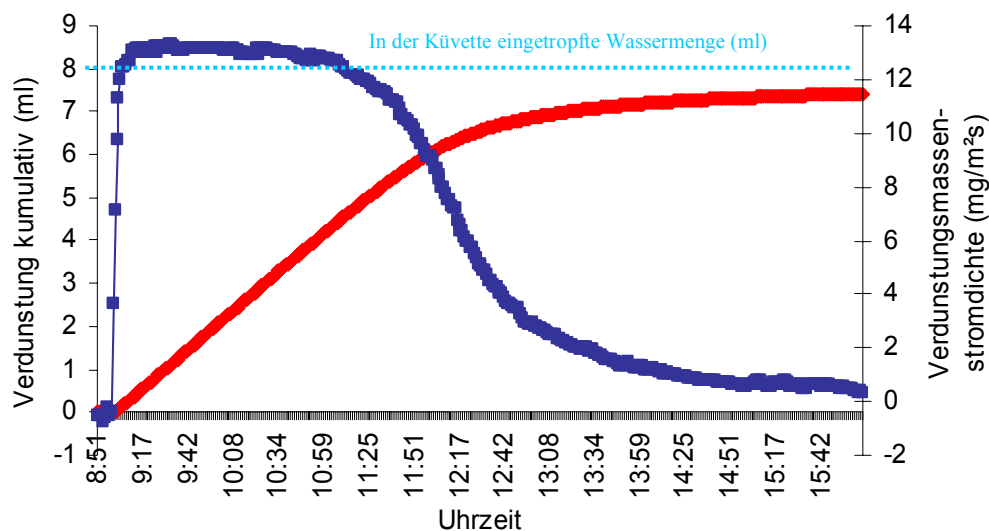


Abb. 24: Verlauf der Verdunstungsmassenstromdichte des in einer Küvette eingeschlossenen Fließpapiers und der kumulative Verdunstungsverlauf bei 8 ml Tropfmenge (blau: die Massensstromdichte, rot: die kumulative Menge)



Aus den gespeicherten Mittelwerten der gemessenen Fließpapierverdunstung wurde die kumulative Verdunstungsmenge berechnet (Abb. 24). Der Verdunstungstest wurde mit 10 ml Eintropfmenge wiederholt. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Messwerte wurden 19 Wiederholungen vorgenommen.

Bei 10 ml eingetropfter Wassermenge wurden aus dem Fließpapier im Durchschnitt 9,97 ml verdunstet. Die Standardabweichung der gebildeten Verdunstungsmengen war 0,58 ml, was als Fehlerindikator der Messgenauigkeit angenommen wird (Abb. 25).

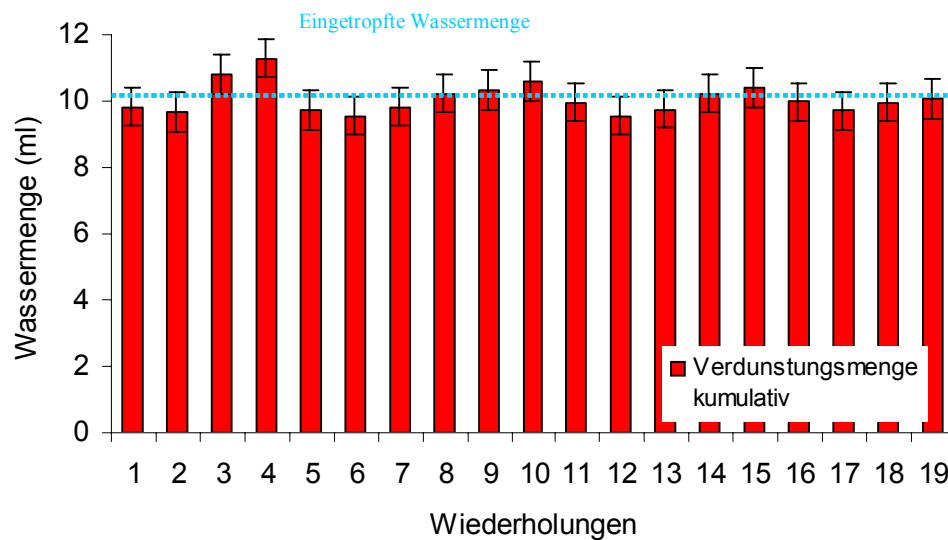


Abb. 25: Die gemessenen Verdunstungsmengen und der Fehlerindikator zur Bestimmung des systematischen Messfehlers des EPM 2005

#### Zufälliger Fehler:

Zur Ermittlung des zufälligen Messfehlers wurden zwei Gaswechsellmessgeräte an zwei unterschiedlichen Standorten des Gewächshauses aufgestellt. *Lycopersicon esculentum* Pflanzen, Sorte „Pannovy“, wurden als Steinwollmattenkultur auf Betontischen unter Versuch gestellt. Der Standort des Messgerätes 1 wurde als „Position 1“ bezeichnet und des Messgerätes 2 als „Position 2“. Zusätzlich zur Erfassung der Verdunstungsmengen wurden über einen optoakustischen CO<sub>2</sub>-Scanner (Fa. SIEMENS) die Nettophotosynthese durch Differenzenbildung der CO<sub>2</sub>-Gehalte der Blattküvettenströme zur Umgebungskonzentration ermittelt (Abb. 26).

Die gemessenen Nettophotosyntheseraten wie auch die Transpirationsraten an den beiden Messorten wichen kaum von einander ab. Der Korrelationskoeffizient der Regressionsfunktion der Transpirationsrate von „Position 2“ in Abhängigkeit der

Transpirationsrate von „Position 1“ war 0,95 (Abb. 27). Der entsprechende Korrelationskoeffizient der Nettophotosyntheseraten war 0,99 (Abb. 28).

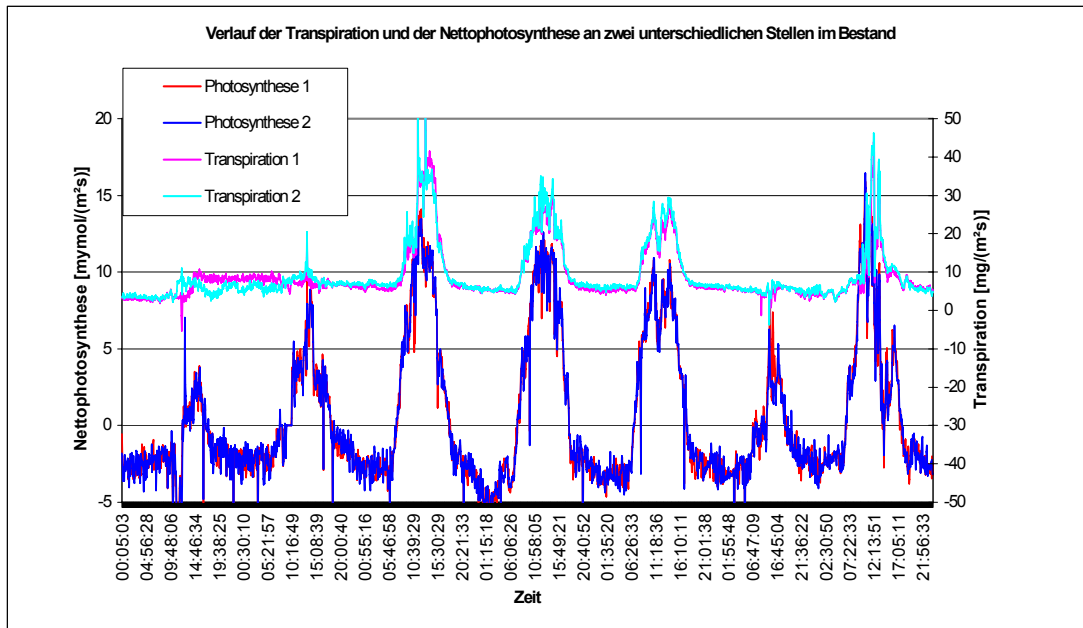


Abb. 26: Verlauf der momentanen Nettophotosynthese und der Transpirationsmassenstromdichte von zwei EPM 2006 Messgeräten an zwei unterschiedlichen Messorten der gleichen Bedingungen

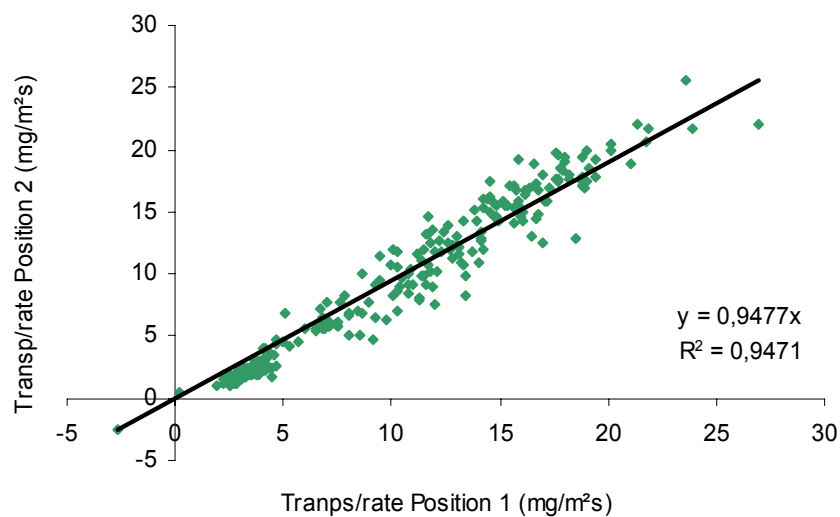


Abb. 27: Korrelation der an zwei Messorten der gleichen Klimabedingungen und durch zwei EPM-Messgeräte gemessenen Bestandstranspirationsraten

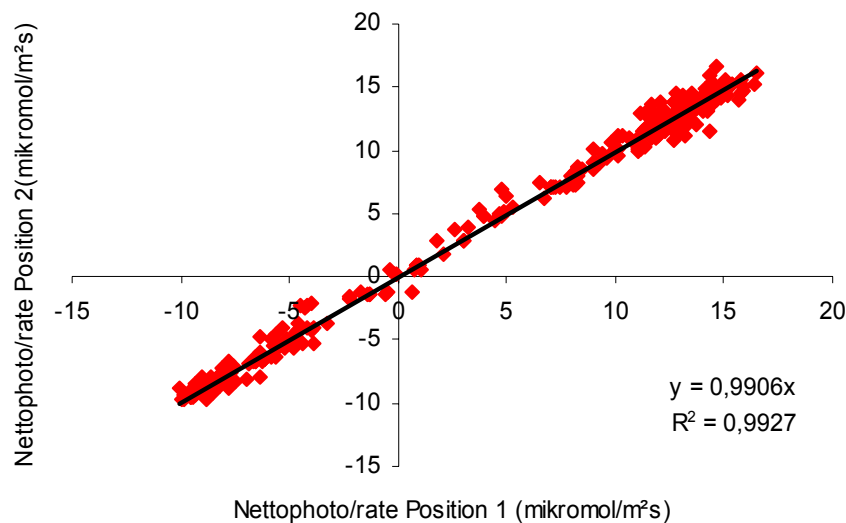


Abb. 28: Korrelation der an zwei Messorten der gleichen Klimabedingungen und durch zwei EPM-Messgeräte gemessenen Nettophotosyntheseraten

#### 4.4.3. Vergleich von Saftstrommessung und Gaswechsellmessung

Zur experimentellen Ermittlung der Messunterschiede zwischen an Blättern gemessenen Transpirationsmengen und Saftstromgeschwindigkeiten an einzelnen Blattstilen wurden beide Messverfahren parallel durchgeführt.

Eine *Lycopersicon esculentum* Kultur, Sorte „Clarence F1“, als Steinwollkultur (Grodanwürfel) wurde unter Versuch gestellt. Die Bewässerung wurde nach der Substratsaugspannung praxisüblich (60 hPa) gesteuert.

Relative Messungen der Saftstromgeschwindigkeit wurden durch den Sensor SF-05 der Fa. PHYTECH Ltd. (Abb. 68) an einem zufällig ausgewählten Blattstängel durchgeführt. Die Transpirationsmessung erfolgte durch das EPM 2006. Die acht Küvetten des Messgerätes wurden an zufällig ausgewählten Blättern der oberen Blattschicht, unterschiedlichen Alters, angebracht. Die Messdaten der Messgeräte werden über eine längere Zeitperiode dargestellt (Abb. 29).

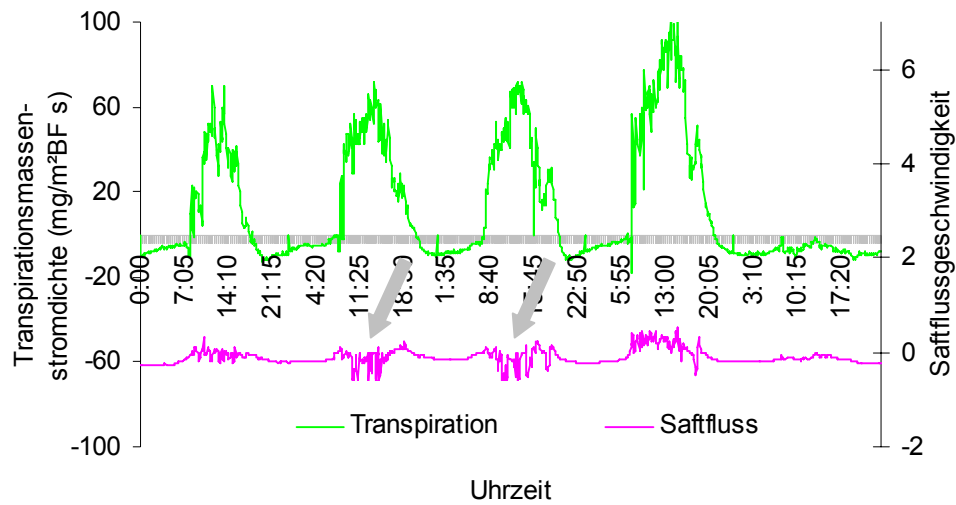


Abb. 29: Verlauf der gemessenen Transpirationsmassenstromdichte und der Saftflussrate über mehrere Tagen - *Lycopersicon esculentum*

Aus den Abb. 29 und 30 ist zu erkennen, dass insbesondere in den Mittagsperioden mit hohen  $VP_{d\text{-}b}$ , und damit auch hohen Blatttranspirationsraten, die Saftstromgeschwindigkeit nicht erwartungsgemäß abnimmt. Korrelative Zusammenhänge zwischen Blatttranspiration und Saftstromgeschwindigkeit konnten nicht gefunden werden.

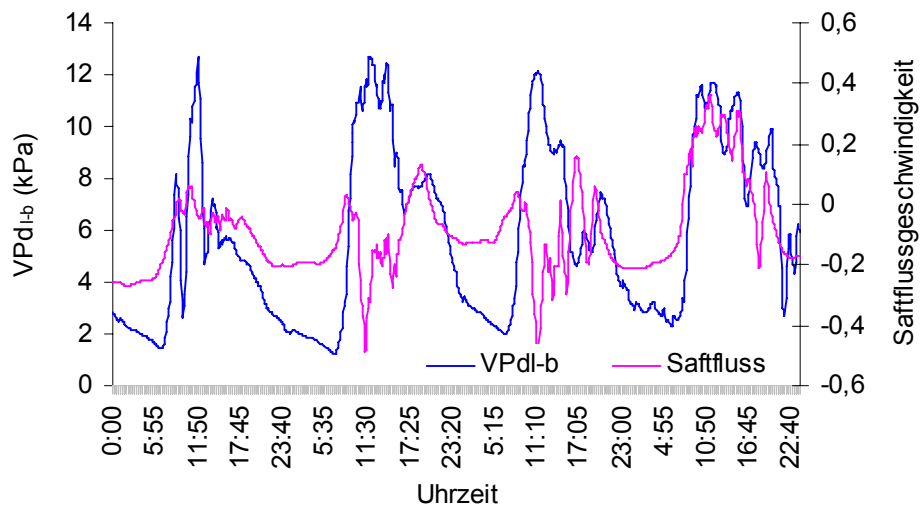


Abb. 30: Verlauf des Saftstroms und des  $VP_{d\text{-}b}$  - *Lycopersicon esculentum*

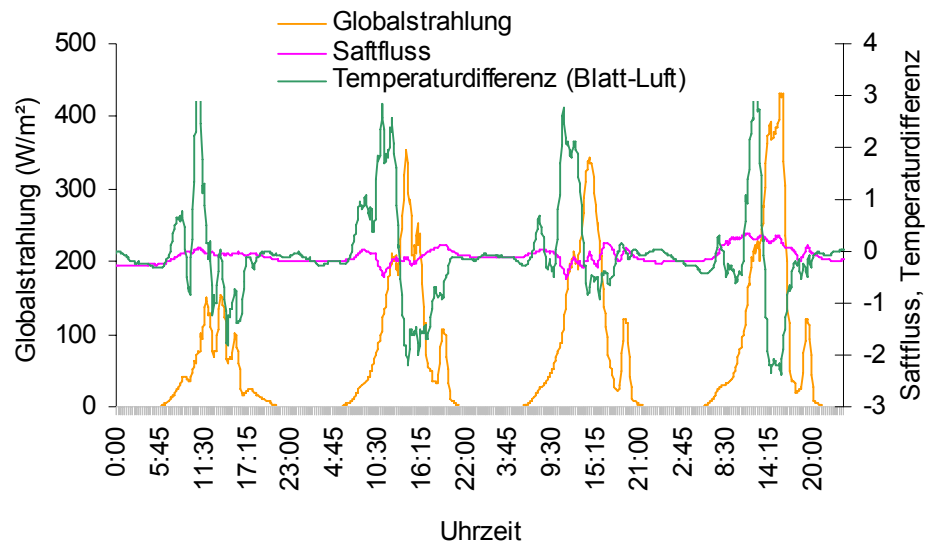


Abb. 31: Verlauf des Saftstroms, der Globalstrahlung und der Temperaturdifferenz zwischen Blatt und Luft - *Lycopersicon esculentum*

Negative Werte der Saftstromgeschwindigkeit wurden in der Tageszeit zwischen 10.00 Uhr und 12.00 Uhr, trotz der steigenden Globalstrahlung (Ab. 31) und der hohen Sättigungsdampfdruckdifferenz  $VP_{d-b}$ , registriert (Abb. 30).

#### 4.5. Erfassung von Transpirationssummen in Pflanzenbeständen

##### 4.5.1. Bestandstranspirationssummen von *Capsicum anuum*

###### 4.5.1.a Versuchsaufbau

*Capsicum anuum*, Sorte „Delgado“, wurden als Dünnschichtkultur auf zwei Tischen (33 m<sup>2</sup>) unter Versuch gestellt (Sollwerte: 27/18°C und 75/60 %). Drei mit Einheitserde (ED 73) gefüllte Kunststoffriren (80 l/Rinne) wurden je Tisch verteilt. Je Rinne wurden 14 Paprikapflanzen eingepflanzt, mit einer Dichte von 10,2 Pfl./m<sup>2</sup>. Ein Tropfsystem wurde zur Bewässerung der Pflanzen eingesetzt. An jeder Pflanzenstelle wurden vier Tropfer verteilt. Das System wurde offen geführt. Jede Rinne wurde mit Mulchfolie abgedeckt, um evaporative Verluste aus dem Substrat zu verhindern (Tab. 22, Abb. 62).

Die Küvetten des EPM 2005 wurden an acht zufällig ausgewählten Pflanzenblättern angeschlossen. Um eventuelle Schäden an den eingeschlossenen Blättern zu vermeiden, wurde die Position der Küvetten regelmäßig alle drei Tage geändert. Als Messstandorte wurden Blätter unterschiedlichen Alters, im oberen und mittleren Bestandsbereich, gewählt. Zwei zufällig positionierte Tensiometer wurden auf den Tischen verteilt.

Die mit Hilfe der in Kap. 4.3.1. beschriebenen Geräte - und mit dem EPM 2005 - erfassten Daten wurden in einem Mess-PC registriert. Die Daten vom EPM, dem CO<sub>2</sub>-Messgerät, dem P-TF 30 und den Tensiometern wurden zyklisch alle 30 s abgefragt und in 5 min Intervallen gemittelt. Die Messdaten wie auch die berechneten Größen waren als Verlaufsdigramm am PC-Monitor sichtbar.

#### **4.5.1.b Versuchsdurchführung**

Am Anfang des Versuchs wurde der Bestand nach einem Saugspannungssollwert bewässert. Zum Bewässerungsstart wurde die Schaltschwelle  $S'$  von 50 hPa ausgewählt. Die Gießzeit  $t_G$  wurde auf 45 s, mit einer Ausbringmenge von 5 l/Takt, festgelegt. Durch regelmäßige Kontrolle der Tropfer konnte eine ungleichmäßige Wasserverteilung ausgeschlossen werden. Jeder Bewässerungsvorgang wurde automatisch nach dem Tag und der Uhrzeit im Prozessleitrechner protokolliert. Wenn die Saugspannung  $S$  (als Mittelwert der aus den zwei Tensiometern eingelesenen Daten) die Schaltschwelle  $S'$  überschritten hat (1), wurde abgefragt, ob die vorgegebene Sperrzeit  $t_s$  (Zeit nach dem Abschluss eines Gießtaktes zur Verteilung der ausgebrachten Wassermenge) abgelaufen war (2). Wenn diese Abfrageanzahl überschritten wurde und trotzdem Bewässerungen ausgelöst werden sollten, wurde ein Alarm im Protokoll registriert. Die Bewässerung wurde abgebrochen (Abb. 32).

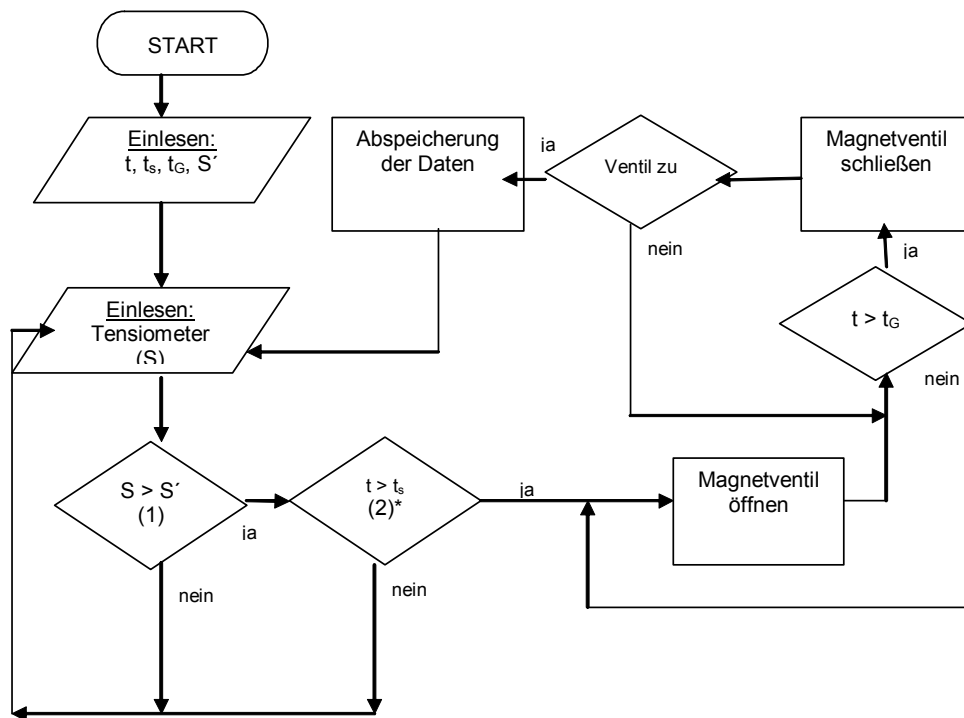


Abb. 32: Flussdiagramm zur saugspannungsgeregelten Bewässerung mit Hilfe von Tensiometern - (\* : Die Routine wird fünfmal abgefragt)

Die Erfassungsmöglichkeit von Transpirationssummen an stark transpirierenden Pflanzen mit hohem LAI-Wert, kultiviert in einem gut puffernden Substrat, wurde durch die Wasserbilanzbildungsmethode überprüft. Die Schaltschwelle  $M'$  des Bewässerungsstarts wurde bei 7,5 l Bestandstranspirationssumme festgelegt. Der Algorithmus dieser Steuerungsmethode erfolgte in drei Schritten: die Primärdatenerfassung, die Transpirationsberechnung und die zeitliche Integration und Bestandsanpassung der berechneten Transpiration (Abb. 33).

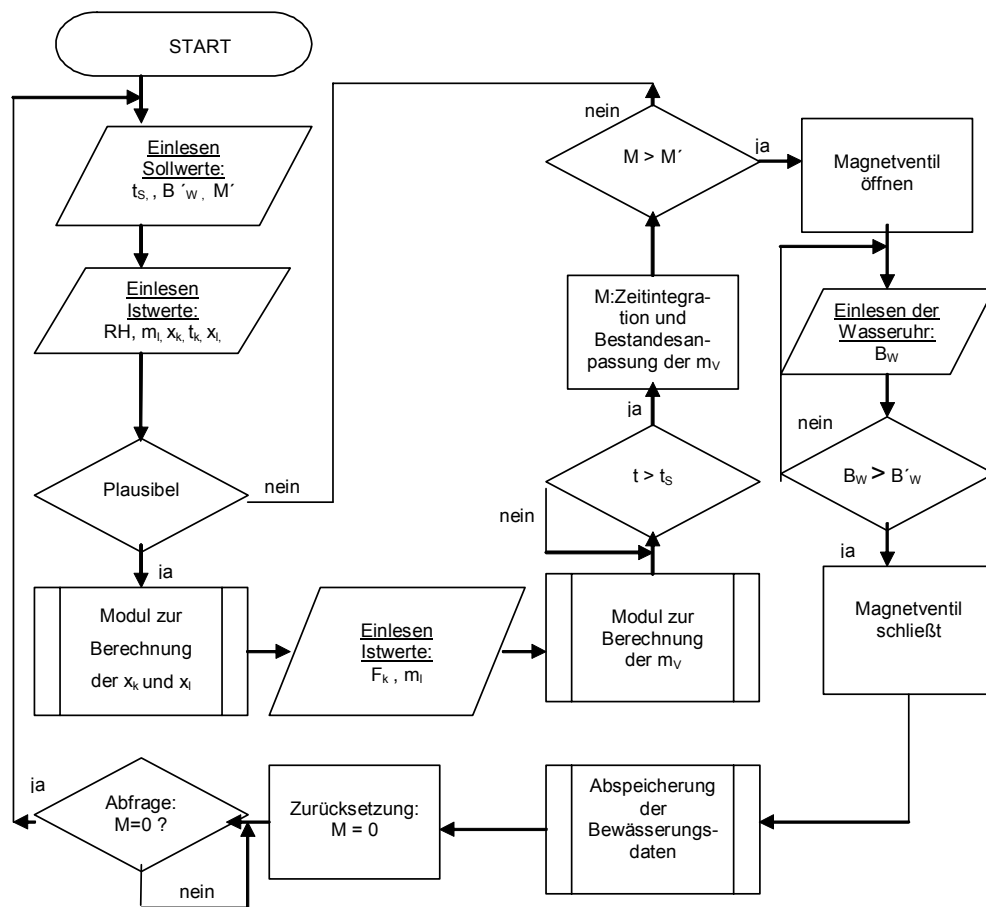


Abb. 33: Flussdiagramm zur transpirationssummengesteuerten Bewässerung mit Hilfe der Gaswechsellmessmethode

Pro Gießtakt wurden 5 l Gießmenge  $B'_w$  beiden Tischen zugeführt. War die aktuelle Transpirationssumme  $M$  größer als die Schaltschwelle  $M'$ , so wurde ein Bewässerungszyklus gestartet. Wie im Algorithmus der Saugspannungssteuerung (Abb. 33) wurde auch hier eine Sperrzeit  $t_s$  eingesetzt, bis  $M$  auf Null zurückgesetzt wurde.

Die tägliche Wasserbilanz des Bestands wurde über eine längere Periode beobachtet und ausgewertet. Am Morgen wurde die Drainagemenge gemessen und registriert. Die zwischen zwei fortlaufenden Registrierungen gemessene Überschusswassersumme wurde als tägliche Überschusswassermenge „A“ registriert. Aus den Tagesprotokollen wurde für jeden Kulturtag die täglich zugeführte Wassermenge „ $\Sigma B$ “ berechnet. Durch Integration und Interpolation der gemes-



senen Transpirationsmassenstromdichte wurde die tägliche Bestandstranspirationssumme „ $\Sigma T$ “ berechnet.

Technische Störungen, die Einwirkung auf die Bewässerungsführung hatten, wurden im Tagesprotokoll lokalisiert und konnten rechtzeitig aufgehoben werden. Eine manuelle Blattflächenmessung erfolgte wöchentlich bei zufällig ausgewählten Pflanzen. Die Breite und Länge der Pflanzenblätter jeder ausgewählten Pflanze wurde gemessen und die berechnete Blattfläche (Breite x Länge) auf den ganzen Bestand hochgerechnet. Die gemessene Bestandsblattfläche wurde wöchentlich in der Berechnungsformel der Bestandstranspiration im Steuerungsalgorithmus aktualisiert.

#### 4.5.1.c Ergebnisse

Aus den Messdaten der Transpirationsmassenstromdichte wurden die Bestandstranspirationssummen zwischen zwei fortlaufenden Bewässerungstakten berechnet.

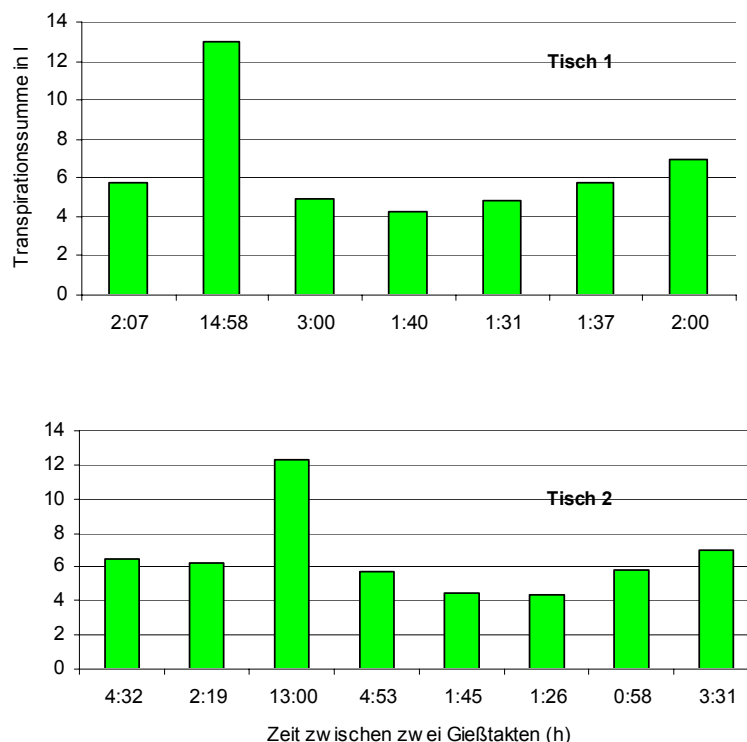


Abb. 34: Transpirationssummen und Zeitdauer zwischen zwei Gießtakte bei einer tensiometergeregelten Bewässerung auf zwei Kulturtischen - *Capsicum annuum* - Schaltwert: 50 hPa

An Tisch 1 wurde zwischen 17.00 Uhr und 08.00 Uhr am folgenden Morgen keine Bewässerung durchgeführt, so dass hohe Transpirationssummen berechnet wurden (ca. 13 l). In den Mittagszeiten wurden kürzere Bewässerungszyklen beobachtet. Die dabei gemessenen Transpirationssummen wichen kaum ab. Die gleichen Beobachtungen wurden auch auf Tisch 2 festgestellt. Zwischen 17.00 Uhr und 06.00 Uhr am folgenden Morgen bildete sich eine Transpirationssumme von ca. 12 l (Abb. 34).

In einer 15-tägigen Auswerteperiode waren die an den zwei Tischen täglich zugeführten Wassermengen nicht signifikant verschieden. Dabei wurden die zwischen den Gießtakte gebildeten Transpirationssummen ( $\Sigma T$ ) ausgerechnet (N=84 pro Tisch). Das prozentuale Verhältnis der Gießmenge/Takt  $B'_w$  (5 l) zu der in dem Gießtakt gebildeten Transpirationssumme ( $\Sigma T$ ) wurde berechnet. An Tisch 1 war der Durchschnitt dieser Rate 39,8 %/Gießtakt und an Tisch 2 38,6 %/Gießtakt (Tab. 7).

Tab. 7: Statistische Werte des prozentualen Verhältnis der Gießmenge zur gemessenen Transpirationssumme im Gießtakt ( $B'_w/\Sigma T$ ) bei einer saugspannungsgeregelten Bewässerung - *Capsicum anuum* – Schaltschwelle: 50 hPa (Tukey's Test, 5%)

	<b>Tisch 1</b>	<b>Tisch 2</b>
(N = 84)	(%)	(%)
<b>Min</b>	19,6	11,8
<b>Max</b>	83,6	90,7
<b>cv%</b>	49,2	56,2
<b>Mtw.</b>	39,8a	38,6a

Zur Bewertung der Erfassungsmöglichkeit von Transpirationssummen wurde das Verhältnis der täglich zugeführten Wassermenge ( $\Sigma B$ ) zur täglichen Transpirationssumme ( $\Sigma T$ ) über einen längeren Zeitraum dargestellt (Abb. 35). Da die Gießmengen/Takt niedriger als der Bewässerungsschaltpunkt lag, haben sich keine Drainagemengen gebildet.

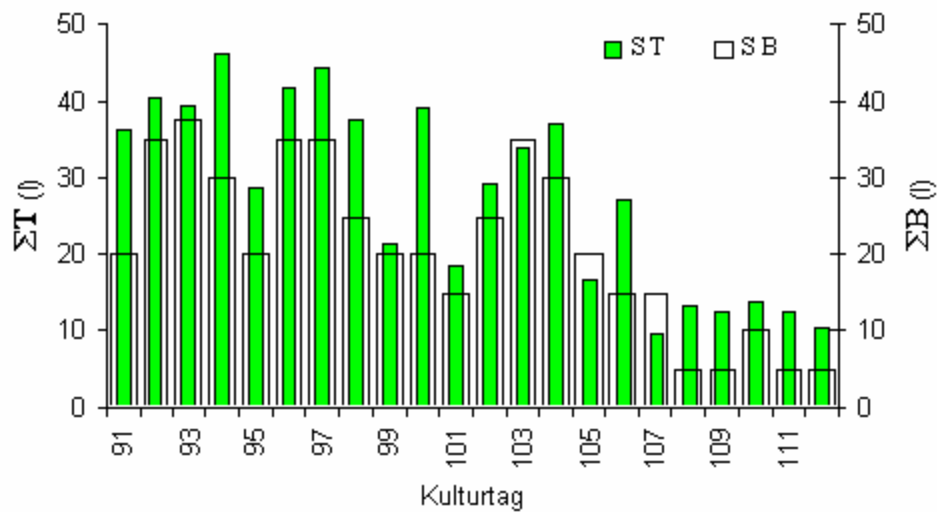


Abb. 35: Das tägliche Verhältnis der zugeführten Wassermenge ( $\Sigma B$ ) zu der Transpirationssumme ( $\Sigma T$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Capsicum annuum* - Schaltschwelle: 7,5 l Transpirationssumme

Tab. 8: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach den gemessenen Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Capsicum annuum* - Schaltschwelle: 7,5 l Transpirationssumme

	$\Sigma B$	$\Sigma T$	$\Sigma B/\Sigma T$
(N=22)	(l)	(l)	(%)
<b>Min</b>	5,0	9,5	37,7
<b>Max</b>	35,0	46,1	157,7
<b>cv%</b>	52,0	44,9	37,6
<b>Mtw.</b>	21,0	27,8	75,6
<b>Gesamt</b>	462,5	611,1	75,7

Im Durchschnitt wurden vom Pflanzenbestand 27,8 l Wasser pro Tag transpiriert. Bei einer Schaltschwelle von 7,5 l Bestandstranspirationssumme wurden täglich im Durchschnitt 24,5 % weniger Wasser zugeführt, als die verdunstete Transpirationssumme. Die  $\Sigma B/\Sigma T$ -Rate hatte einen Mittelwert von 75,6 % (Tab. 8).

#### **4.5.2. Bestandstranspirationssummen von *Lycopersicon esculentum***

##### **4.5.2.a Versuchsaufbau**

*Lycopersicon esculentum*, Sorte „Rondello“, wurden in Container als Tischkultur (Tischgröße: 16 m<sup>2</sup>) unter Versuch gestellt (Sollwerte: 21/15 °C und 75/60 %). Das Fassungsvermögen der Container war 5 l und wurde mit Einheitserde (ED 73) gefüllt. Die Container wurden auf gesonderten Metallschienen aufgestellt. 36 Pflanzen wurden in 2 Reihen aufgestellt. Die Pflanzendichte war 2,2 Pfl./m<sup>2</sup> (Tab. 23, Abb. 64 a) und b)).

Die Bewässerung erfolgte über ein Mikrokanaltropfsystem. Die Ausbringleistung der Tropfer betrug 2 l/h. An jedem Container wurden zwei Tropfer verteilt. Das System wurde offen geführt. Zur Aufnahme der Überschussmengen wurden Metallschüsseln unter jedem Container angebracht. Um die Evaporation zu verhindern, wurde das gesamte System der Container-Schüsseln mit einer weißen Mulchfolie abgedeckt.

Die acht Küvetten des EPM 2005 wurden an den Blättern zufällig ausgewählter Pflanzen befestigt, um die pflanzlichen Wasserumsätze zu erfassen. Als Messstandort wurden Blätter unterschiedlichen Alters, im oberen und mittleren Bestandsbereich, gewählt. Um eventuelle Schäden an den eingeschlossenen Blättern zu vermeiden, wurde die Position der Küvetten regelmäßig verändert. Die Erfassung und Registrierung der Daten erfolgte wie im Paprikaversuch (vgl. Kap. 4.5.1.a.).

##### **4.5.2.b Versuchsdurchführung**

Um zu überprüfen, inwieweit die gemessenen Daten der Transpirationsmassenstromdichte, der Bewässerungssteuerung dienen können, wurden die täglichen Bestandwasserbilanzen über eine längere Zeitperiode gebildet (vgl. Kap. 4.5.1.b.). Als Schaltschwelle der Bewässerung wurde die Bestandstranspirationssumme von 7 l gewählt. Pro Bewässerungstakt wurden 10 l Nährlösung zugeführt. Zur Verhinderung von ungleichmäßiger Wasserverteilung wurden auch bei diesem Versuch die Tropfer regelmäßig kontrolliert.

#### 4.5.2.c Ergebnisse

Gebildet wurden die täglichen Wasserbilanzen an 13 Kulturtagen. Ein guter Ausgleich der täglichen Wasserbilanzen wurde festgestellt (Abb. 36).

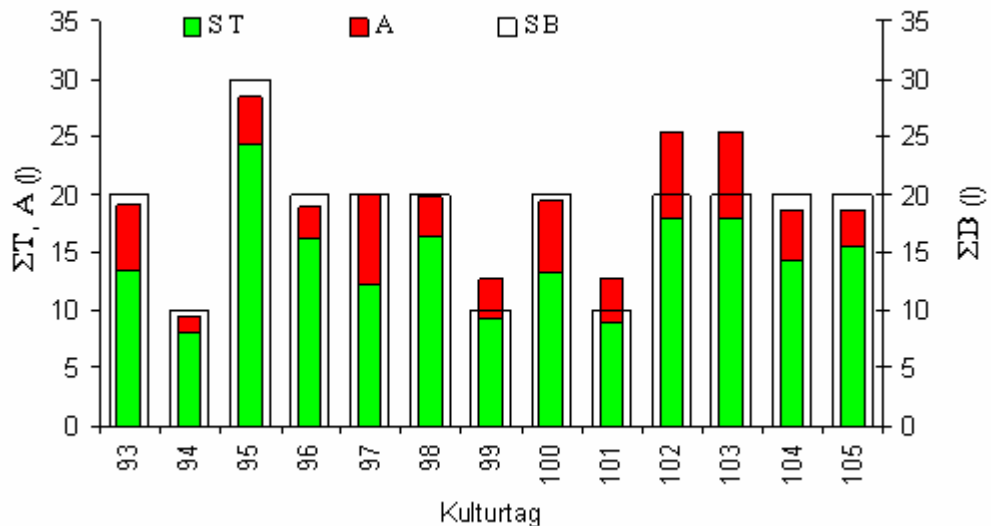


Abb. 36: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Lycopersicon esculentum* - Schaltschwelle: 7l Transpirationssumme

Tab. 9: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - *Lycopersicon esculentum* - Schaltschwelle: 7l Transpirationssumme

	$\Sigma B$	$\Sigma T$	$A$		$F_B$
(N=13)	(l)	(l)	(l)	%	(l)
<b>Min</b>	10,0	8,1	1,4	13,9	-5,3
<b>Max</b>	30,0	24,3	7,7	38,5	1,5
<b>cv%</b>	31,7	30,5	42,5	39,6	416,7
<b>Mtw.</b>	18,3	14,4	4,7	26,0	-0,6
<b>Gesamt</b>	240,0	187,7	60,6	25,3	-8,4

Im Durchschnitt wurden vom Pflanzenbestand 14,4 l Wasser pro Tag transpiriert. Die an einem Tag registrierten Bewässerungstakte lagen zwischen 1 und 3, mit einem täglich zugeführten Wassermengendurchschnitt von 18,3 l. Der prozentuale Anteil der täglichen Überschusswassermenge zu der zugeführten Menge hatte einen Mittelwert von 26,0 %. Aus den 240,0 l zugeführten Wassermengen entsprachen 78,2 % der gesamten Bestandstranspirationsumsätze und 25,3 % der

gesamten Überschusswassermenge. Der Bilanzfehler schwankte zwischen  $-5,3$  und  $1,5$  l, mit einem Durchschnitt von  $-0,6$  l/Tag. Der Bilanzfehler über die gesamte Auswerteperiode war  $-8,4$  l bzw.  $-3,5$  % (Tab. 9). Der  $WUE_T$  betrug im Durchschnitt  $0,8$ , mit einem Variationskoeffizient von  $13,0$  %.

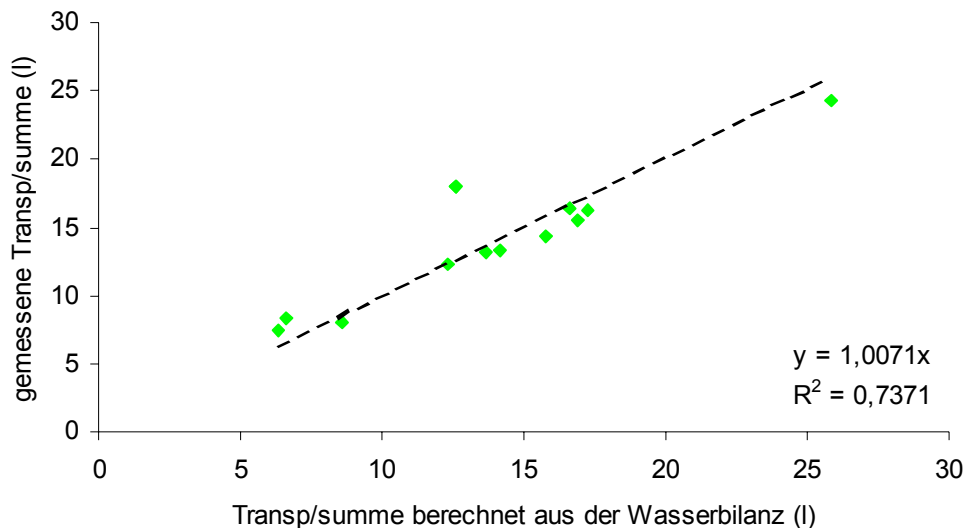


Abb. 37: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen von den aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen einer transpirationssummen-gesteuerten Kultur - *Lycopersicon esculentum* ( $p < 0,001$ )

Der Korrelationskoeffizient der durch das EPM 2005 gemessenen Transpirationssummen in Abhängigkeit der aus den täglich zugeführten und abgeführten Wassermengen ermittelten Transpirationssummen ( $\Sigma T = \Sigma B - A$ ) betrug  $0,7$  (Abb. 37).

#### 4.5.3. Bestandstranspirationssummen von *Gerbera jamensonii*

##### 4.5.3.a Versuchsaufbau

*Gerbera jamensonii*, Sorten „Molina“ und „Lilabella“, wurden zur Messung von Pflanzentranspirationssummen unter Versuch gestellt (Sollwerte:  $22/15^\circ\text{C}$  und  $60/80$  %). Die Experimente wurden in Thessaloniki (Griechenland) durchgeführt, um möglichst hohe Wasserumsätze zu erzielen.

Die Pflanzen wurden als Containerkultur auf einen Metallgittertisch ( $3,82 \text{ m}^2$ ) angebaut. Die Container hatten ein Fassungsvermögen von  $12$  l und wurden mit Perlit gefüllt. Die zwei Sorten wurden jeweils auf den zwei Seiten des Tisches verteilt. 16

Pflanzen von jeder Sorte standen unter Versuch. Die Pflanzendichte betrug 8,4 Pfl./m<sup>2</sup>. Auch hier wurden die Container mit Mulchfolie abgedeckt (Tab. 26, Abb. 65 und 66). Die Klimasteuerung erfolgte automatisch.

Ein Mikrokanal-Tropfsystem der Fa. NETAFIM wurde zur Bewässerung der Pflanzen eingesetzt. Die Tropfleistung betrug 2 l/h. An jeder Pflanzenstelle wurde ein Tropfer verteilt. Das System wurde offen geführt. Das Überschusswasser aus dem Container floss tischweise in eine Kunststoffrinne, die 30 cm unterhalb des Gitternetzes angeordnet wurde. Die Drainagewassermengen wurden in zwei großen Containern aufgefangen. Die Erfassung der Transpirationsmassenstromdichte erfolgte wie in Kap. 4.5.1.a.

#### **4.5.3.b Versuchsdurchführung**

Im Rahmen der optimalen Bewässerungssteuerung nach gemessenen Bestands-transpirationswerten ist die Frage, ob die Methode der Gaswechsellmessung auch in Gewächshäusern mit eingeschränkter technischer Ausrüstung und demzufolge niedriger Klimaführungseffizienz, einsetzbar ist. Zur Überprüfung der Erfassungsmöglichkeit von Transpirationssummen durch die Gaswechsellmessmethode unter hohen Einstrahlungs- und niedrigen Feuchtigkeitsbedingungen wurden wie im Tomatenversuch (vgl. Kap. 4.5.2.b) auch hier Langzeitbeobachtungen durchgeführt. Dabei wurden die täglichen Wasserbilanzen des *Gerbera jamensonii* Bestands gebildet (vgl. Kap. 4.5.2.c). Als Schaltschwelle der Bewässerung wurde die Bestandstranspirationssumme von 1,5 l eingestellt. Pro Bewässerungstakt wurden 2,5 l Wasser zugeführt. Zur Verhinderung von ungleichmäßiger Wasserverteilung wurden auch in diesem Versuch die Tropfer regelmäßig kontrolliert.

#### **4.5.3.c Ergebnisse**

Zur Bildung der täglichen Wasserbilanzen des Gerberabestands wurden 28 Kulturtage ausgewertet. Die gebildeten Wasserbilanzen der einzelnen Tage waren ausgeglichen (Abb. 38).

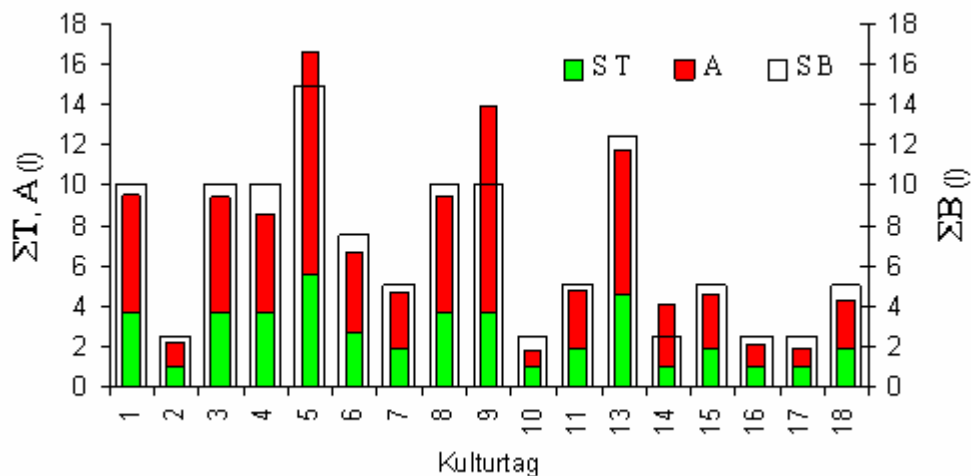


Abb. 38: Die tägliche Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Gerbera jamensonii* - Schaltschwelle: 1,5 l Transpirationssumme

Tab. 10: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - *Gerbera jamensonii* - Schaltschwelle: 1,5 l Transpirationssumme

	$\Sigma B$	$\Sigma T$	$A$		$F_B$
(N=28)	(l)	(l)	(l)	%	(l)
<b>Min</b>	2,5	0,92	0,9	36,0	-3,9
<b>Max</b>	25,0	9,2	14,3	128,0	1,7
<b>cv%</b>	60,4	59,0	61,3	29,9	220,0
<b>Mtw.</b>	10,6	3,9	6,2	58,9	0,5
<b>Gesamt</b>	297,5	109,5	174,7	58,7	13,3

Im Durchschnitt wurden vom Pflanzenbestand 3,9 l Wasser pro Tag transpiert. Es wurde täglich zwischen 1 und 10 Bewässerungstakte ausgelöst. Durchschnittlich wurden täglich 10,6 l zugeführt. Der prozentuale Anteil der Überschusswassermenge zu der zugeführten Menge hatte einen Mittelwert von 58,9 %/Tag. Aus den in der gesamten Auswerteperiode 297,5 l zugeführten Wassermenge entsprachen 36,2 % den gesamten Bestandstranspirationsumsätzen und 58,7 % den gesamten Überschusswassermengen. Der Fehler der Bilanz variierte zwischen –3,9 und 1,7 l, mit einem Durchschnittswert von 0,5 l/Tag. Der Bilanzfehler über die gesamte Auswerteperiode war 13,3 l bzw. 4,5 % (Tab. 10). Der  $WUE_T$  betrug im Durchschnitt 0,4 mit einem Variationskoeffizient von 14,8 %.



Für *Gerbera jamensonii* lag der Korrelationskoeffizient der durch das EPM 2005 gemessenen Transpirationssummen in Abhängigkeit der aus den täglich zugeführten und abgeführten Wassermengen ermittelten Transpirationssummen ( $\Sigma T = \Sigma B - A$ ), bei 0,8 (Abb. 39).

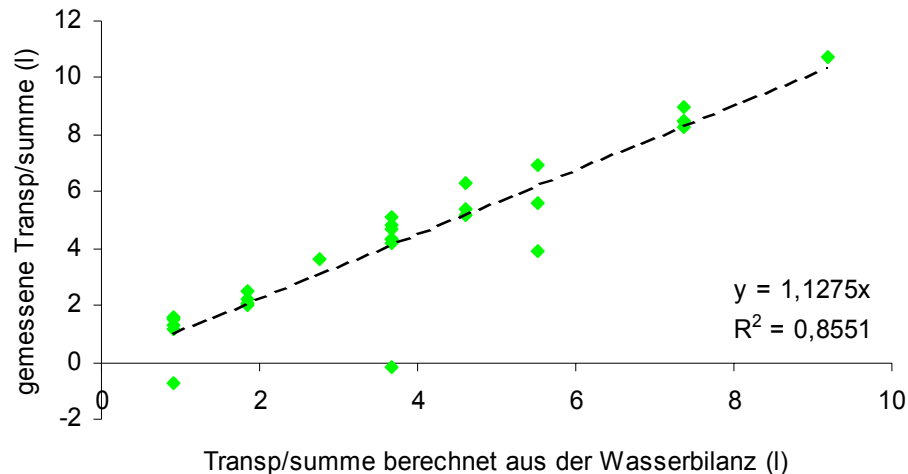


Abb. 39: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen einer transpirationssummengesteuerten Kultur von dem aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen - *Gerbera jamensonii* ( $p < 0,001$ )

#### 4.6. Automatische Bewässerungssteuerung durch gemessene Transpirationssummen

##### 4.6.1. Kurzzeitanalysen von *Lycopersicon esculentum*

###### 4.6.1.a Versuchsaufbau

*Lycopersicon esculentum*, Sorten „Rondello“ und „Bolero“, wurden in Containern als Tischkultur unter Versuch gestellt (Sollwerte: 27/16 °C und 75/60 %). Der Versuch wurde am gleichen Standort und ähnlich wie im Kap. 4.5.2.a. aufgebaut (Tab. 24).

Die Mikrokanaltropfer des Bewässerungssystems hatten eine Leistung von 2 l/h. Es wurde ein Tropfer pro Container verteilt. 18 Pflanzen der Sorte „Rondello“ wurden auf der rechten und 18 Pflanzen der zweiten Sorte auf der linken Tischseite verteilt.

Zur Kontrolle der Substratsaugspannung wurden drei Tensiometer (Nr. 3, 4, 5) in

beliebig ausgewählten Containern platziert. Parallel zur transpirationssummen-gesteuerten Variante wurde eine zweite Steuerungsvariante nach dem gleichen Kultur- und Tröpfchensystem geführt. Die Bewässerung erfolgte nach dem Tensiometerprinzip. Dafür dienten drei zufällig platzierte Tensiometer (Nr. 6, 7, 8).

#### **4.6.1.b Versuchsdurchführung**

Die kurzzeitigen Änderungen der Pflanzenwasseraufnahme aus dem Boden werden stark durch die Substratsaugspannung geprägt. Eventuelle Wasserstresssituationen sind rechtzeitig im Saugspannungsverlauf zu erkennen. Besonders unter hohen Verdunstungsbedingungen (Sommerperiode) kommen solche Stresssituationen oft vor. Ziel des Versuches war die Einstellung eines gleich bleibenden Mittelwertes der Saugspannung über mehrere Bewässerungszyklen.

Als Schaltschwelle der Bewässerung wurde die Bestandstranspirationssumme von 3 l vorbestimmt. Pro Bewässerungstakt wurden 4 l Nährlösung zugeführt. Die zweite Steuerungsvariante wurde nach dem gleichen Prinzip wie in Abschnitt Kap. 4.5.1.b. (vgl. Abb. 32) bewässert. Die Schaltschwelle der Bewässerungssteuerung wurde bei 50 hPa festgelegt. Eingelesen wurde der Mittelwert der drei Tensiometerdaten. Pro Bewässerungstakt wurden 3 l Nährlösung zugeführt.

Die Berechnung der täglichen Wasserbilanzen in der transpirationssummen-gesteuerten Variante wurde wie in Kap. 4.5.1.b. durchgeführt. Parallel wurden nach dem gleichen Prinzip und für die gleiche Kulturperiode die täglich zugeführten und überschüssigen Wassermengen der saugspannungsgesteuerten Variante berechnet.

#### **4.6.1.c Ergebnisse**

Zur Bildung der täglichen Wasserbilanzen bei *Lycopersicon esculentum* wurden 25 Kulturtage ausgewertet. Es wurden 196 Bewässerungstakte registriert. Die gebildeten Wasserbilanzen der einzelnen Tage waren ausgeglichen (Abb. 40).

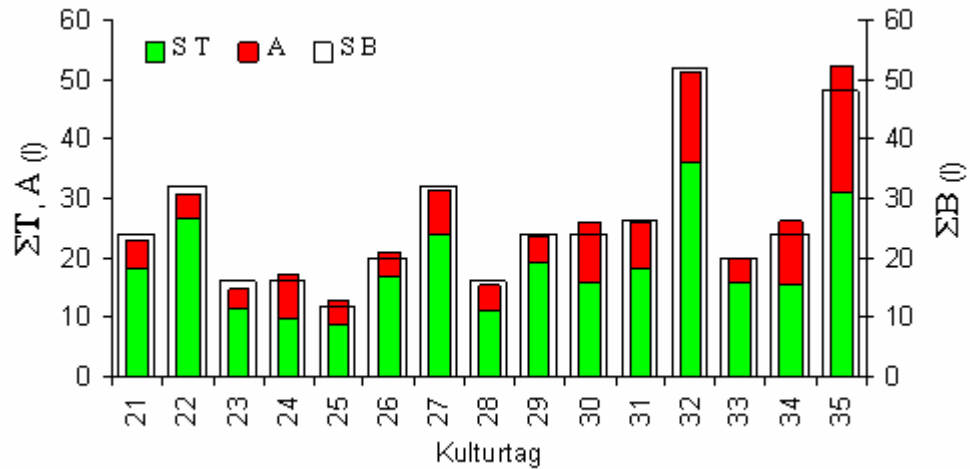


Abb. 40: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Lycopersicon esculentum* - Schaltschwelle: 3 l Transpirationssumme

Tab. 11: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - *Lycopersicon esculentum* - Schaltschwelle: 3 l Transpirationssumme

	$\Sigma B$	$\Sigma T$	A		$F_B$
(N=25)	(l)	(l)	(l)	%	(l)
<b>Min</b>	12,0	11,2	3,2	14,8	-10,1
<b>Max</b>	88,0	69,0	28,7	57,4	2,2
<b>cv%</b>	51,5	54,7	70,3	37,3	182,5
<b>Mtw.</b>	32,6	23,4	11,1	32,2	-2,0
<b>Gesamt</b>	784,0	561,8	267,4	34,1	-47,8

Die durchschnittlichen Verdunstungsmengen des Bestands waren 23,4 l/Tag. Es wurde täglich zwischen 4 und 22mal bewässert. Durchschnittlich wurde täglich 32,6 l Wasser den Pflanzen zugeführt. Der Überschusswassermengendurchschnitt betrug 11,1 l/Tag (32,2%). Aus der 784,0 l zugeführten Wassermenge entsprachen 71,6 % den gesamten Bestandstranspirationssumsätzen und 34,1 % den gesamten Überschusswassermengen. Der Fehler der Bilanz variierte zwischen -10,1 und 2,2 l, mit einem Durchschnitt von -2 l/Tag. Der Bilanzfehler über die gesamte Auswerteperiode war -47,8 l bzw. -6,1 % (Tab. 11). Der  $WUE_T$  betrug im Durchschnitt 0,7 mit einem Variationskoeffizient von 11,5 %.

Der Korrelationskoeffizient, der durch das EPM 2005 gemessenen Transpirationssummen in Abhängigkeit der aus den täglich zugeführten und abgeführten Wassermengen ermittelten Transpirationssummen ( $\Sigma T = \Sigma B - A$ ), betrug 0,9 (Abb. 41).

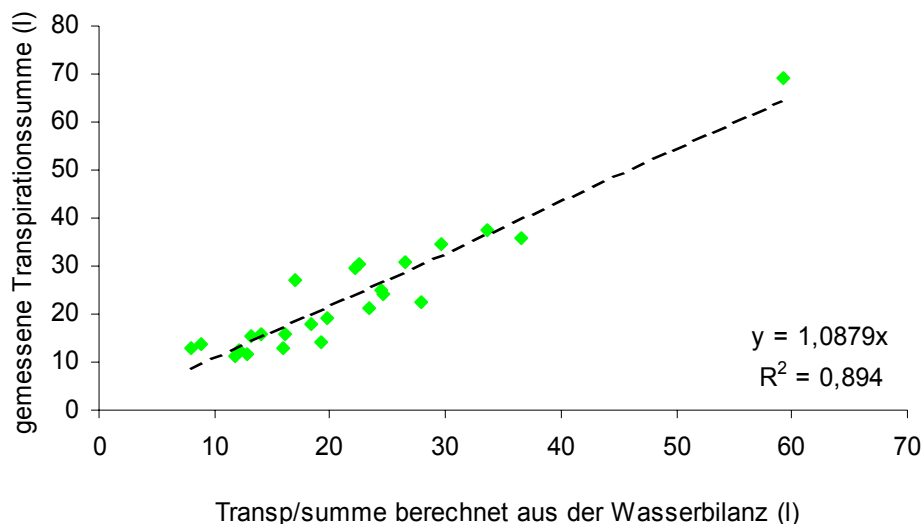


Abb. 41: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen einer transpirationssummengesteuerten Kultur von den aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen - *Lycopersicon esculentum* ( $p < 0,001$ )

Im gleichen Kulturzeitraum wurden für die Saugspannungsvariante 211 Bewässerungstakte registriert. Im Durchschnitt wurden täglich 24,2 l Nährlösung zugeführt und 3,4 l als Überschusswasser aufgenommen. In der gesamten Auswerteperiode wurde 13,9 % der gesamten Bewässerungsmenge wieder aufgefangen (Tab. 12).

Tab. 12: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der Saugspannung geregelten Bewässerung - *Lycopersicon esculentum* – Schaltschwelle: 50 hPa

	$\Sigma B$	A	
(N=25)	(l)	(l)	%
<b>Min</b>	3,0	0,5	2,4
<b>Max</b>	48,0	6,3	77,3
<b>cv%</b>	48,4	47,1	84,9
<b>Mtw.</b>	24,2	3,4	17,1
<b>Gesamt</b>	633,0	87,9	13,9

Die Substratsaugspannung am Standort „2“ und „3“ (Tensio 2,3) hatten einen ähnlichen Verlauf. Der über 24 h gleitende Durchschnitt des Saugspannungsmittelwerts verblieb in der Wochenperiode um die 30 hPa. Eine leichte Absenkung der Saugspannung wurde an den letzten zwei Kulturtagen beobachtet. Um 20 hPa trockener verlief der Saugspannungsdurchschnitt über 24 h am Standort „1“. Auch hier wurde an den gleichen Tagen eine leichte Saugspannungsabsenkung beobachtet (Abb. 42).

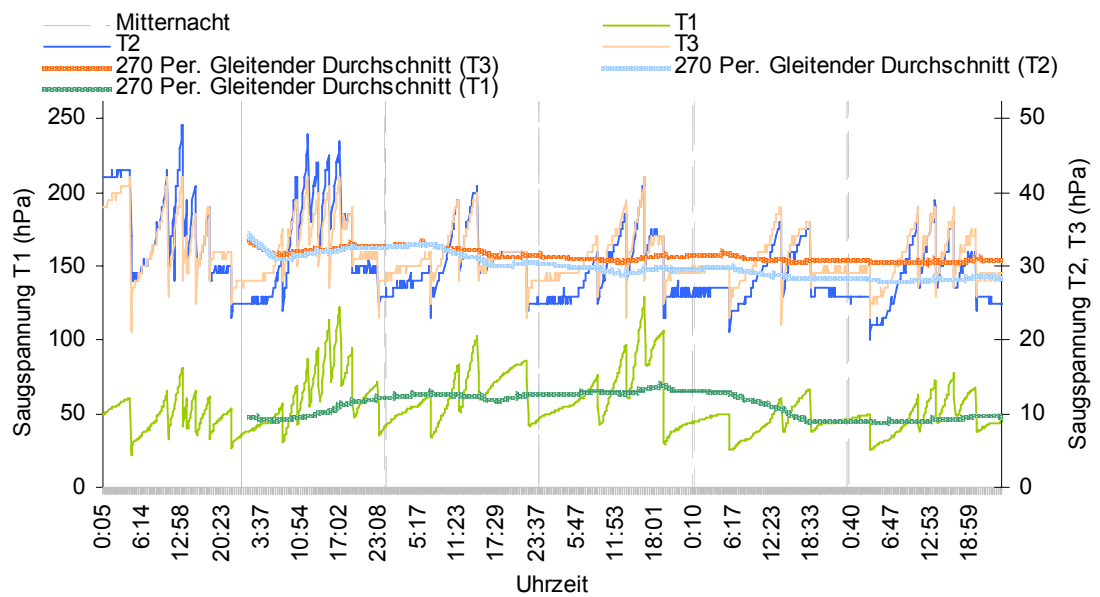


Abb. 42: Saugspannungsverlauf des Substrates in drei zufällig ausgewählten Standorten in einer transpirationssummengesteuerten Bewässerung - *Lycopersicon esculentum* – Schaltschwelle: 3 l

Der aus den drei Tensiometerdaten (Abb. 42) gebildete Mittelwert wird in Abb. 43 dargestellt. Der gleitende Durchschnitt dieses Mittelwertes über 24 h (270 Daten) variierte im Bereich zwischen 35 und 45 hPa.

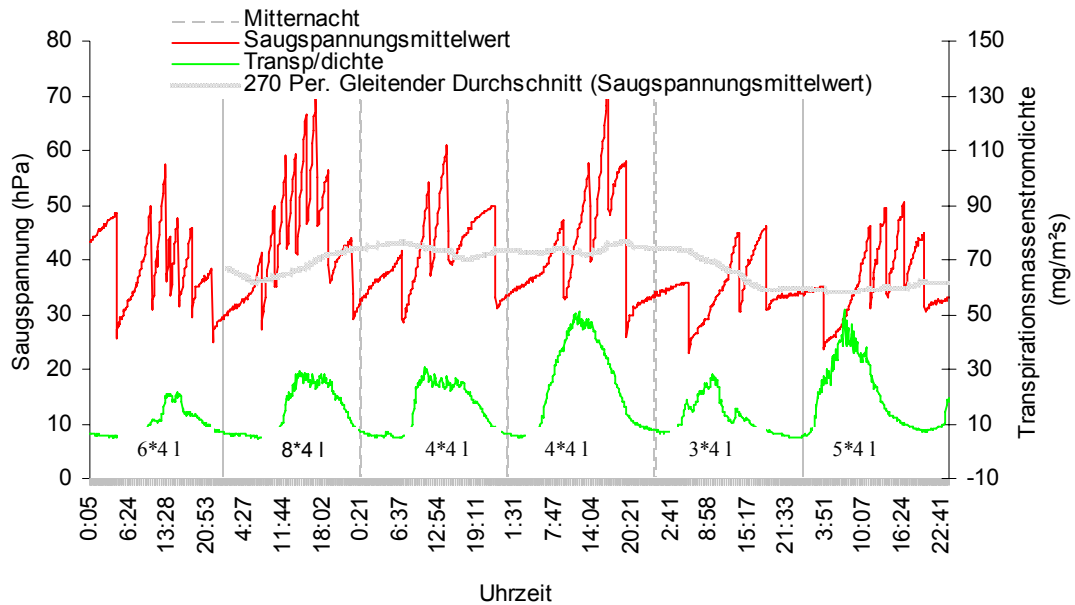


Abb. 43: Der Verlauf der Transpirationsmassenstromdichte und des aus drei Tensiometer gebildeten Mittelwertes der Substratsaugspannung bei einer transpirationssummengesteuerten Bewässerung - *Lycopersicon esculentum* – Schaltschwelle: 3 l

Im Vergleich zu der saugspannungsgesteuerten Variante verlief die Saugspannung der transpirationssummengesteuerten Variante relativ gleich, mit einer leichten Absenkung an den letzten Tagen der Wochenperiode (Abb. 44).

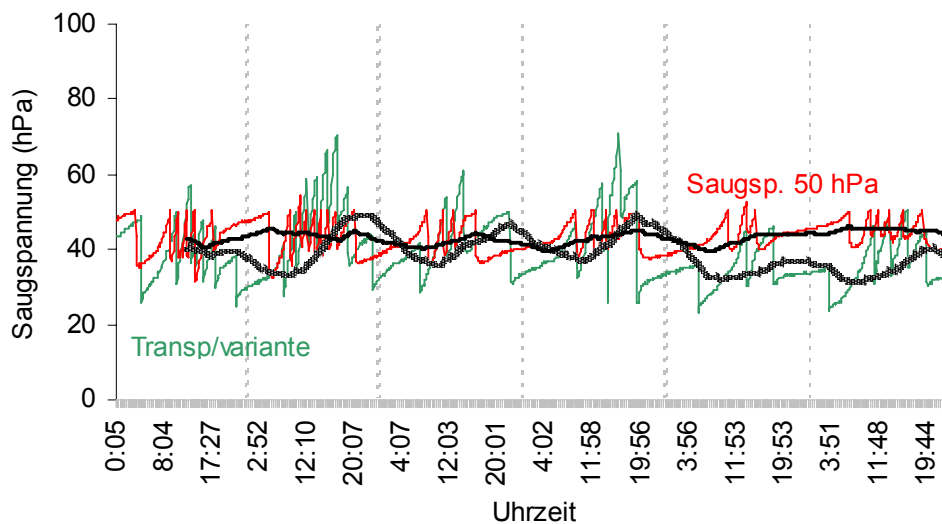


Abb. 44: Saugspannungsverlauf und gleitender Durchschnitt (144 Perioden. = 12 h) unter Transpirationssummen - und Saugspannungsteuerung der Bewässerung - *Lycopersicon esculentum*

#### **4.6.2. Bewässerungssteuerung von *Gerbera jamensonii* mit einer angestrebten Überschussmenge unter hohen Einstrahlungsbedingungen**

##### **4.6.2.a Versuchsaufbau**

Der im Kap. 4.5.3. beschriebene Versuch von *Gerbera jamensonii* wurde im Herbst beendet. Die Versuchspflanzen wurden unter einer zeitgesteuerten Bewässerungsmethode bis zum Frühjahr weiterkultiviert. Der Aufbau der transpirationssummengesteuerten Variante von Kap. 4.5.3.a. wurde nicht geändert (Tab. 27). Die Gewächshaustemperatur und –luftfeuchte wurden automatisch gesteuert (Sollwerte: 28/23°C und 80/60 %).

Parallel zur transpirationssummengesteuerten Variante wurde eine zweite Steuerungsvariante nach dem gleichen Kultur- und Tröpfchensystem geführt. Das Bewässerungssystem der Fa. RAINBIRD (Zeitsteuerung) wurde zur Steuerung der Vergleichsvariante eingesetzt. Die für die zeitgesteuerte Variante eingesetzten Kulturpflanzen waren im gleichem Wachstumsstadium und gleichem Alter wie die der Transpirationsvariante.

##### **4.6.2.b Versuchsdurchführung**

Ziel des Versuches war es, eine praxisübliche Bewässerungsführung mit 30 % Überschusswasser durch gemessene Transpirationssummen, besonders unter hohen Einstrahlungsbedingungen, zu steuern. Dafür wurden Langzeitanalysen (Tagessummen) der Wasserumsätze durchgeführt.

Als Schaltschwelle der Bewässerung wurde die Bestandstranspirationssumme von 700 ml vorgegeben. Um eine angestrebte Überschusswassermenge von 30 % zu erreichen, wurde die Bewässerungsmenge pro Takt mit 900 ml bestimmt. Die Berechnung der täglichen Wasserbilanzen in der transpirationssummengesteuerten Variante wurde wie in Kap. 4.5.1.b. durchgeführt.

Die Bewässerungszeiten der zeitgesteuerten Variante wurden wie folgt vorbestimmt: 09:00, 12:00, 14:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00, 01:00 Uhr. Für die Mittagsperiode wurden kürzere Bewässerungszyklen ausgewählt. Bei dieser Variante wurden pro Takt 1200 ml Nährlösung zugeführt. Nach dem gleichen Prinzip und für die gleiche Kulturperiode wurden auch für diese Variante die täglich zugeführten und überschüssigen Wassermengen berechnet.

#### 4.6.2.c Ergebnisse

Es wurden 17 Kulturtage ausgewertet. Unter den hohen mediterranen Einstrahlungsbedingungen der Sommerperiode waren die täglich gebildeten Wasserbilanzen der *Gerbera jamensonii* Kultur ausgeglichen (Abb. 45).

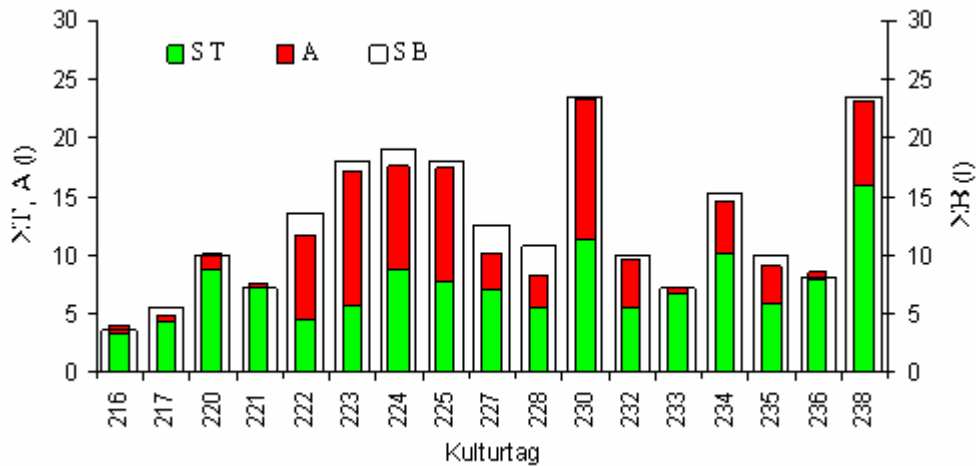


Abb. 45: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Gerbera jamensonii* - Schaltschwelle: 700 ml Transpirationssumme

Es wurden 239 Bewässerungstakte gesteuert. Die durchschnittliche Transpirationssumme des Bestands war bei 7,4 l/Tag. Die an einem Tag registrierten Bewässerungstakte waren zwischen 4 und 26. Im Durchschnitt wurden den Pflanzen 11,2 l/Tag Wasser zugeführt. Der tägliche Überschusswassermengendurchschnitt betrug 3,9 l (34,8 %). Aus der 215,1 l zugeführten Wassermenge entsprach 58,5 % der gesamten Bestandstranspirationsumsätze und 36,2 % den gesamten Überschusswassermengen. Der Bilanzfehler variierte zwischen -0,4 und 2,5 l, mit einem Durchschnitt von 0,7 l/Tag. Der Bilanzfehler über die gesamte Auswerteperiode war 11,3 l bzw. 5,2 % (Tab. 13). Der  $WUE_T$  betrug im Durchschnitt 0,7 mit einem Variationskoeffizient von 34,4 %.



Tab. 13: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - *Gerbera jamensonii* - Schaltschwelle: 700 ml Transpirationssumme

	$\Sigma B$	$\Sigma T$	$A$		$F_B$
(N=17)	(l)	(l)	(l)	%	(l)
<b>Min</b>	3,6	3,2	0,5	6,2	-0,4
<b>Max</b>	23,4	15,9	11,9	62,8	2,5
<b>cv%</b>	53,6	40,5	102,6	53,7	128,6
<b>Mtw.</b>	11,2	7,4	3,9	34,6	0,7
<b>Gesamt</b>	215,1	125,9	77,8	36,2	11,3

Der Korrelationskoeffizient, der durch das EPM 2005 gemessenen Transpirationssummen in Abhängigkeit der aus den täglich zugeführten und abgeführten Wassermengen ermittelten Transpirationssummen ( $\Sigma T = \Sigma B - A$ ), betrug 0,9 (Abb. 46).

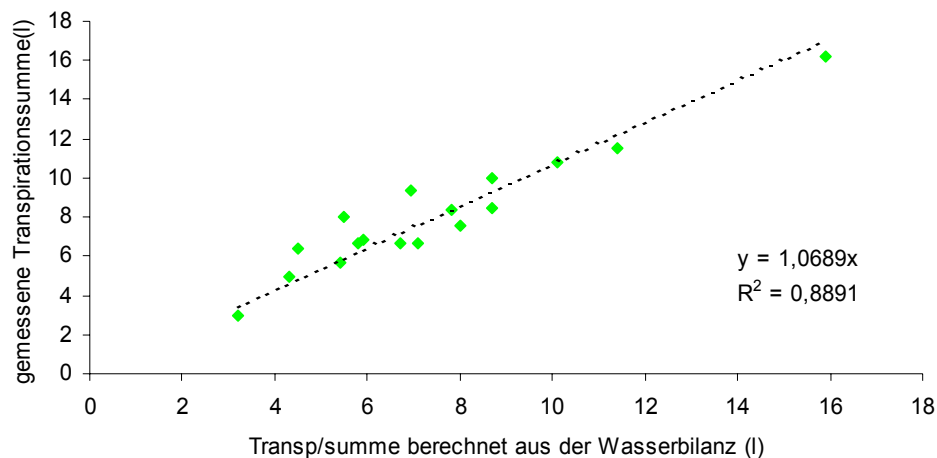


Abb. 46: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen einer transpirationssummengesteuerten Kultur von den aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen - *Gerbera jamensonii* ( $p < 0,001$ )

In der zeitgesteuerten Variante wurden 139 Bewässerungstakte gesteuert. Die täglich zugeführte Wassermenge betrug 9,6 l/Tag. Die entsprechenden Überschusswassermengen differierten zwischen 1,0 und 5,8 l, mit einem täglichen Durchschnitt von 41,4 %. In der gesamten Auswerteperiode wurden 41,4 % der Wassergabemenge als Überschusswasser abgeführt (Abb. 47, Tab. 14).

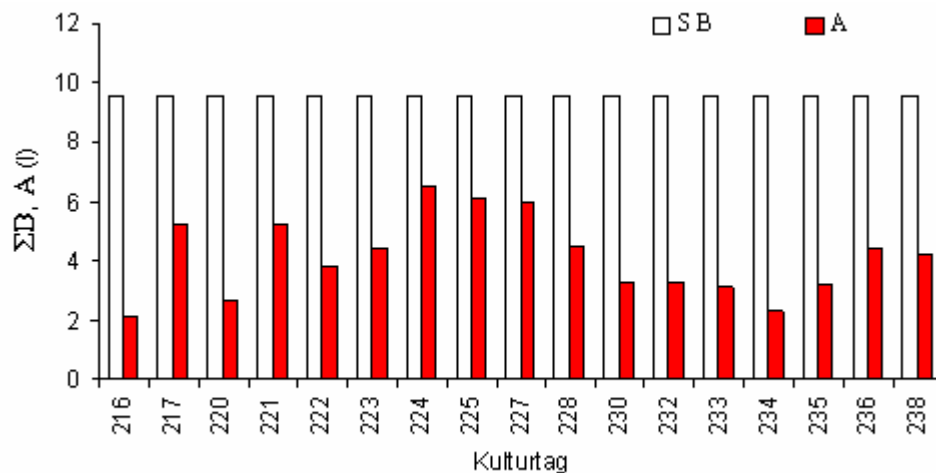


Abb. 47: Die täglich zugeführten Wassermengen  $\Sigma B$  und die Überschusswassermengen A einer zeitgesteuerten Bewässerung - *Gerbera jamensonii*

Tab. 14: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer zeitgesteuerten Bewässerung - *Gerbera jamensonii*

	$\Sigma B$	A	
(N=17)	(l)	(l)	%
<b>Min</b>	9,6	2,1	21,8
<b>Max</b>	9,6	6,5	67,7
<b>cv%</b>	0,0	32,2	43,1
<b>Mtw.</b>	9,6	4,1	31,3
<b>Gesamt</b>	163,2	70,3	43,1

#### 4.6.3. Bewässerungssteuerung von *Lycopersicon esculentum* mit limitierenden Überschusswassermengen

##### 4.6.3.a Versuchsaufbau

*Lycopersicon esculentum*, Sorte „Prospero“, wurden in Containern als Tischkultur unter Versuch gestellt (Sollwerte: 21/15 °C und 75/60 %). Der Versuch wurde am gleichen Standort und ähnlich wie in Kap. 4.5.2.a. aufgebaut. Die Tropfer des Bewässerungssystems hatten eine Leistung von 2 l/h. Es wurde ein Tropfer pro Container verteilt (Tab. 25). Zur Kontrolle der Substratsaugspannung wurden zwei Tensiometer (Nr.1, 2) in beliebig ausgewählten Containern platziert.

Parallel zur transpirationssummengesteuerten Variante wurden zwei weitere Steuerungsvarianten nach dem gleichen Kultur- und Tröpfchensystem geführt. Auf der 60 hPa Variante wurden zwei Tensiometer (Nr. 4, 5) und auf der 30 hPa Variante drei Tensiometer (Nr. 6, 7, 8) zufällig auf die Bestände verteilt.

#### **4.6.3.b Versuchdurchführung**

Das Ziel war, eine bedarfsgerechte Bewässerungsteuerung nach den gemessenen Transpirationssummen zu erreichen. Eine minimale Drainage aus dem Substrat wurde für Analysezwecke angestrebt. Als Schaltschwelle der Bewässerung wurde am Anfang die Bestandstranspirationssumme von 3 l vorbestimmt. Pro Bewässerungstakt wurden 3 l Nährlösung zugeführt. Die Substratsaugspannung wurde durch zwei Tensiometer kontinuierlich beobachtet.

Die Möglichkeit der Adaption des Saugspannungsverlaufes (als Trend über 24 h) im Steuerungsalgorithmus wurde untersucht. Dabei wurde im Steuerungsalgorithmus die Schaltschwelle entsprechend des Saugspannungstrends geändert. Die Schaltschwelle wurde im Laufe des Kulturzeitraums auf 2 l und zum Schluss auf 1 l Transpirationssumme reduziert.

Die zweite Steuerungsvariante wurde nach dem Mittelwert der drei Tensiometer bei 60 hPa bewässert. Pro Bewässerungstakt wurden 3 l Nährlösung zugeführt. Entsprechend wurde die dritte Variante bei 30 hPa mit der gleichen Gießmenge bewässert.

#### **4.6.3.c Ergebnisse**

In der gesamten Kulturperiode wurden in der Transpirationsvariante 332 Bewässerungen durchgeführt, die 60 hPa Variante wurde 318mal bewässert. Wesentlich mehr wurde die 30 hPa Variante bewässert (459 Gießakte). In der transpirationsgesteuerten Variante wurden insgesamt 4,5 % der zugeführten Wassermengen als Überschusswasser aufgenommen. Die 60 hPa Variante ergab einen gesamten Überschussanteil von 3,3 % und die der 30 hPa Variante von 21,7 % (Tab. 15).

Tab. 15: Zugeführte und abgeführte Wassermengen der drei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei *Lycopersicon esculentum* (Tukey's Test, 5%)

Zeitperiode	Transpirationsvariante				Saugspannungsvar. 60 hPa				Saugspannungsvar. 30 hPa			
	Gießtakte	SB	A	%A	Gießtakte	SB	A	%A	Gießtakte	SB	A	%A
	(l)	(l)	(l)		(l)	(l)	(l)		(l)	(l)	(l)	
25.09-08.10	51	153	3,3	2	60	180	3,1	2	67	201	12,9	6
09.10-22.10	59	177	11,5	6	80	240	10,5	4	103	309	73,3	24
23.10-05.11	72	216	5,5	3	51	153	3,6	2	138	414	158,2	38
06.11-19.11	63	189	12,6	7	53	159	4,8	3	59	177	11,9	7
20.11-07.12	87	261	11,7	4	74	222	9,2	4	92	276	42,4	15
<b>Gesamt:</b>	332a	996a	44,6a	4,5a	318a	954a	31,2a	3,3a	459b	1377b	298,7b	21,7b
<b>MTW %A je Variante:</b>	<b>4,4</b>				<b>3,0</b>				<b>18,0</b>			

Am Beginn lag die Schaltschwelle der Bewässerung bei 2 l Transpirationssumme. Die Saugspannung des Substrates war ca. 60 hPa. Bei gleichbleibender Schalt-schwelle stieg die Saugspannung in höheren Bereichen. Erst nach Adaption der Schaltschwelle durch den veränderten LAI-Wert bewegte sich der Saugspannungstrend zum Nullpunkt. Bei einer Schaltschwelle von 1 l Transpirationssumme verlief die Saugspannung im Bereich von ca. 60 hPa, mit einer steigenden Tendenz im Laufe der Kulturperiode. Nach erneuter Reduzierung der Schaltschwelle bewegte sich der Trend auch zum Nullpunkt (Abb. 48)

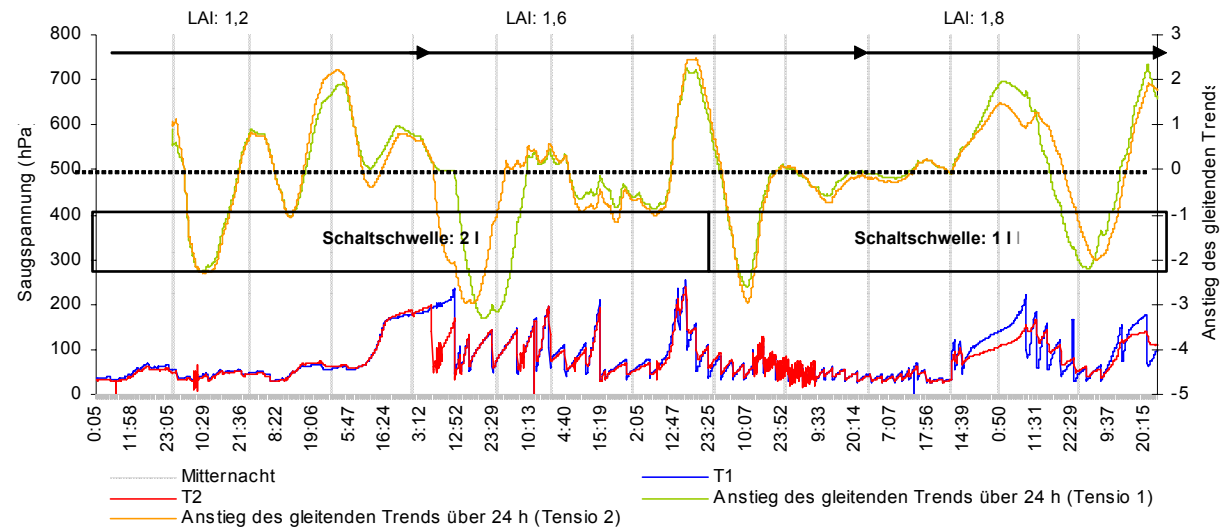


Abb. 48: Der Anstieg des gleitenden Saugspannungstrends über 24 h bei unterschiedlichen Schaltschwellen der transpirationssummen gesteuerten Bewässerung und der Verlauf der Saugspannung an zwei Standorten - *Lycopersicon esculentum*

#### **4.6.4. Bewässerungssteuerung von *Cucumis sativus* mit limitierenden Überschusswassermengen**

##### **4.6.4.a Versuchsaufbau**

*Cucumis sativus* Pflanzen, Sorte „Stamm 8234, F1“, wurden in Containern als Tischkultur unter Versuch gestellt (Sollwerte: 23/16°C, 80/60 %). Der Versuch wurde am gleichen Standort und ähnlich wie in Kap. 4.5.2.a. aufgebaut. Die Tropfer des Bewässerungssystems hatten eine Leistung von 2 l/h. Es wurde ein Tropfer pro Container verteilt (Tab. 28, Abb. 67 a)). Zur Kontrolle der Substratsaugspannung wurden zwei Tensiometer (Nr.1, 2) in beliebig ausgewählten Containern platziert.

Parallel zur transpirationssummengesteuerten Variante wurden zwei weitere Steuerungsvarianten nach dem gleichen Kultur- und Tröpfchensystem geführt. Die Bewässerung erfolgte nach dem Tensiometerprinzip. Pro Variante wurden drei Tensiometer nach dem Zufallsprinzip verteilt.

##### **4.6.4.b Versuchsdurchführung**

Eine exakte Bewässerungssteuerung wurde mit *Cucumis sativus* erprobt. Auch hier wurde ein minimaler Überschussanteil angestrebt. Als Schaltschwelle der Bewässerung wurde am Versuchsanfang die Bestandstranspirationssumme von 3 l festgesetzt. Pro Bewässerungstakt wurden 3 l Nährlösung zugeführt. Die Substratsaugspannung wurde kontinuierlich beobachtet. Auch hier wie in Kap. 4.6.3.c. wurde die Schaltschwelle entsprechend des Saugspannungstrends geändert.

Die zweite Steuerungsvariante wurde aus dem Mittelwert der drei zur Verfügung stehenden Tensiometer bei 60 hPa bewässert. Pro Bewässerungstakt wurden 3 l Nährlösung zugeführt. Entsprechend wurde die dritte Variante bei 40 hPa bewässert. Die Berechnung der täglichen Wasserbilanzen wurde wie in Kap. 4.5.2.b. durchgeführt.

##### **4.6.4.c Ergebnisse**

In der gesamten Kulturperiode wurden in der transpirationsgesteuerte Variante 96 Bewässerungen durchgeführt. Die 60 hPa Variante wurde 118mal und die 40 hPa Variante 248mal bewässert. Der Überschussanteil der Transpirationsvariante

betrug insgesamt 2 % und der 60 hPa Variante 9,0 %. Die entsprechende Menge für die 40 hPa Variante war 51,0 % (Tab. 16).

Tab. 16: Zugeführte und abgeführte Wassermengen der drei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei *Cucumis sativus*

Zeitperiode	Transpirationsvariante				Saugspannungsvar. 60 hPa				Saugspannungsvar. 40 hPa			
	Gießstakte	SB	A	%A	Gießstakte	SB	A	%A	Gießstakte	SB	A	%A
		(l)	(l)			(l)	(l)			(l)	(l)	
25.1-7.2	7	21	1,7	8,1	19	57	3,1	5,4	22	66	31,5	48
8.2-21.2	27	81	0,7	0,9	32	96	22,5	23,0	83	249	140,5	56
22.2-7.3	62	186	3,5	1,9	67	201	6,4	3,2	143	429	205,8	48
<b>Gesamt:</b>	<b>96a</b>	<b>288a</b>	<b>5,9a</b>	<b>2,0a</b>	<b>118a</b>	<b>354a</b>	<b>31,8a</b>	<b>9,0a</b>	<b>248b</b>	<b>744b</b>	<b>378,6b</b>	<b>51b</b>
<b>MTW %A je Variante:</b>	<b>3,6a</b>				<b>11,0a</b>				<b>51,0b</b>			

Zu Beginn lag die Schaltschwelle der Bewässerung bei 1 l Transpirationssumme. Aufgrund der steigenden Tendenz der Substratsaugspannung wurde die Schaltschwelle auf 0,7 l und später auf 0,5 l Transpirationssumme herabgesetzt. Um die Saugspannung auf niedrigen Bereichen zu senken wurde daraufhin die Schaltschwelle auf 0,3 l Transpirationssumme herabgesenkt. Auch hier wurde ein schwankender Saugspannungstrend beobachtet, der erst bei einer Schaltschwelle von 0,3 l Transpirationssumme sich dem Nullpunkt näherte (Abb. 49).

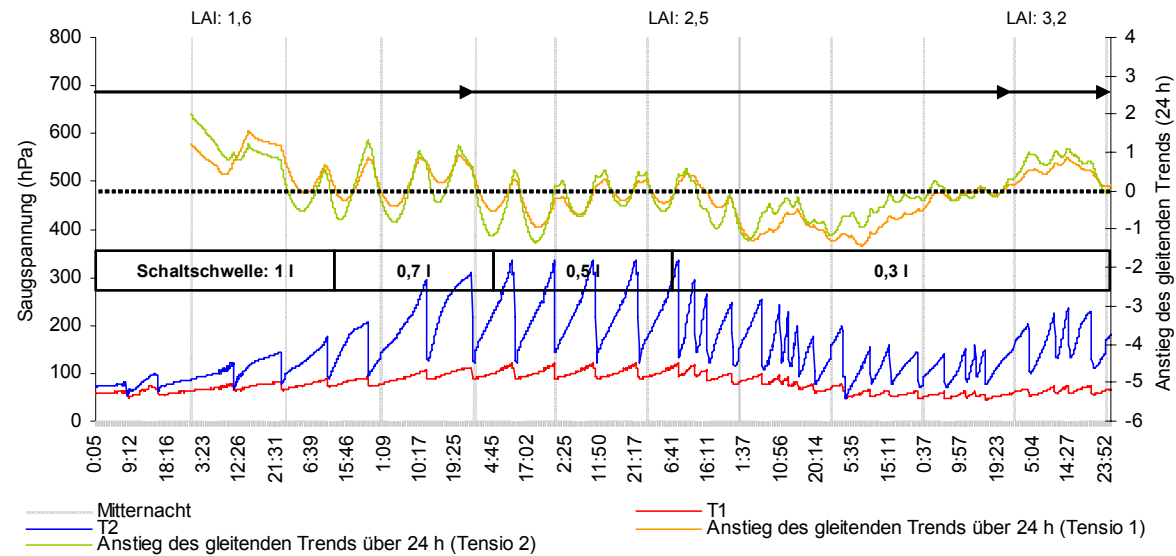


Abb. 49: Der Anstieg des gleitenden Saugspannungstrends über 24 h bei unterschiedlicher Schaltsschwelle der transpirationssummengesteuerten Bewässerung und der Verlauf der Saugspannung an zwei Standorten - *Cucumis sativus*



#### 4.7. Stickstoffdynamik in der bedarfsgerechten Bewässerungssteuerung

Um die Auswirkung einer bedarfsgerechten Bewässerungssteuerung auf die Stickstoffdynamik des Substrats zu untersuchen, wurde für die Versuche in den Kap. 4.6.3. und 4.6.4. der Substratstickstoffgehalt ( $N_{\min}$ ) ermittelt. Die Zusammenstellung der Nährlösung war für den *Lycopersicon esculentum* Bestand: N 140, P 44, K 160, Ca 150 und Mg 60 ppm/l Nährlösung und für den *Cucumis sativus* Bestand: N 170, P 50, K 260, Ca 150 und Mg 60 ppm/l Nährlösung. Die EC- und pH-Werte der Nährlösungen wurden zwischen 1,5-2,5 mS/dm und pH 5,8-6,5 gehalten (Applikation von Phosphorsäure zur Korrektur des pH-Wertes).

Die Proben wurden in 15tägigen Perioden mit einem Stechzylinder aus unterschiedlichen Substrattiefen entnommen. Eine Mischprobe von je acht Substratstandorten pro Bewässerungsvariante wurde zusammengestellt. Zur Bestimmung des Stickstoffgehaltes wurde die „Cotte-Kahane“ Methode angewandt. Die Untersuchungen wurden im Labor des Instituts für Pflanzenernährung und Düngung der Humboldt Universität zu Berlin durchgeführt.

Parallel und nach dem gleichen Verfahren wurde der Stickstoffgehalt der Überschusswassermengen ermittelt. Aus den einzelnen Überschussmengen wurde eine Mischprobe erstellt. Dies konnte erst dann erfolgen, wenn Überschussmengen auftraten. Der EC- und pH-Wert, wie auch die Temperatur der Nährlösung und der Mischprobe, wurden täglich gemessen und registriert.

##### 4.7.1. $N_{\min}$ -Gehalt im Substrat und im Überschusswasser

Aus der Analyse der Stichproben des Substrats wurde der Verlauf des  $N_{\min}$ -Gehalts im Substrat der drei Bewässerungsvarianten, während der Kulturperiode, dargestellt.

Bei unterschiedlichen Bewässerungsmengen pro Variante kam es zu keinen unterschiedlichen Verläufen des Stickstoffgehaltes ( $N_{\min}$ ) in den Substraten, sowohl bei *Lycopersicon esculentum* (Abb. 50) als auch bei *Cucumis sativus* (Abb. 51). Im Tomatenversuch wurden am Anfang der Kulturperiode hohe Stickstoffgehalte im Substrat festgestellt. Ab den 17. Kulturtag folgte eine Einschränkung dieser Mengen über die folgenden Kulturwochen, mit einer leichten Erhöhung zum Versuchsende. Im

Gurkenversuch wurden eindeutig höhere  $\text{NO}_3$ -Mengen im Substrat festgestellt, die zu höheren  $\text{N}_{\min}$ -Gehalten führten (Abb. 51).

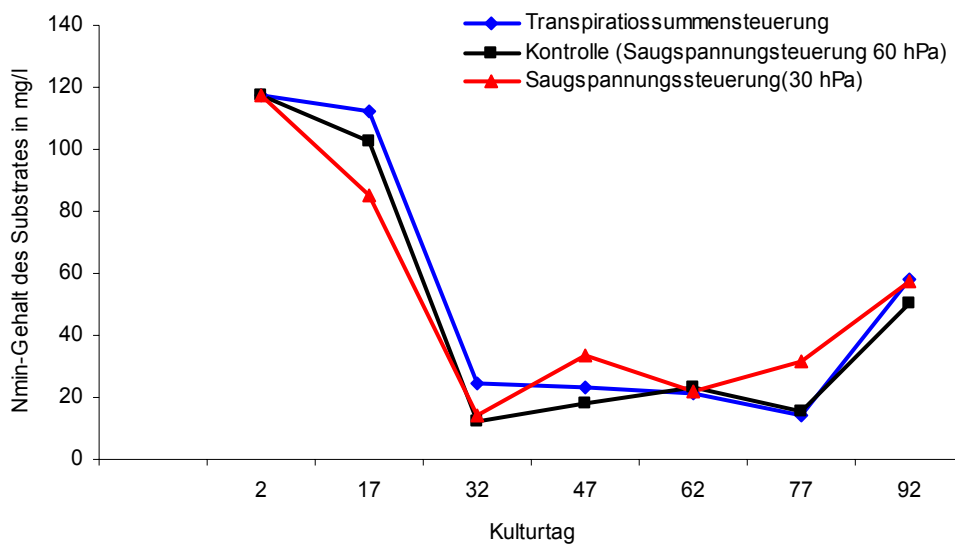


Abb. 50: Verlauf des  $\text{N}_{\min}$ -Gehaltes im Substrat bei unterschiedlichen Bewässerungssteuerungsvarianten bei *Lycopersicon esculentum*

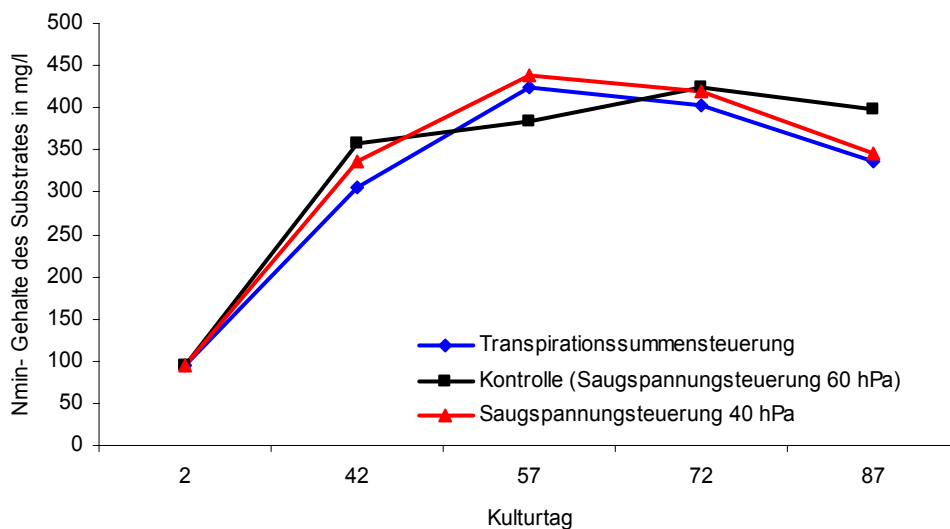


Abb. 51: Verlauf des  $\text{N}_{\min}$ -Gehaltes im Substrat bei unterschiedlichen Bewässerungssteuerungsvarianten bei *Cucumis sativus*

Nach der gleichen Methode zur Bestimmung des  $\text{N}_{\min}$ -Gehaltes im Substrat wurde auch der  $\text{N}_{\min}$ -Gehalt in den aufgefangenen Überschusswassermengen jeder

Steuerungsvariante ermittelt. Wie im Substrat, wurden für beide Kulturen keine Unterschiede im  $N_{\min}$ -Gehalt der Überschusswassermengen in den drei Steuerungsvarianten festgestellt (Abb. 52, 53). Die in den ersten Kulturwochen aufgefangenen Überschussmengen der Tomatenbestände hatten einen niedrigen Stickstoffgehalt, der sich später in höheren Bereichen stabilisierte und sich zum Versuchsende erhöhte. Der Stickstoffgehalt der Überschussmengen in den Gurkenbeständen war sehr hoch im Vergleich zu dem der Tomatenbestände, was durch die hohen  $NO_3$ -Gehalte verursacht wurde (Abb. 53).

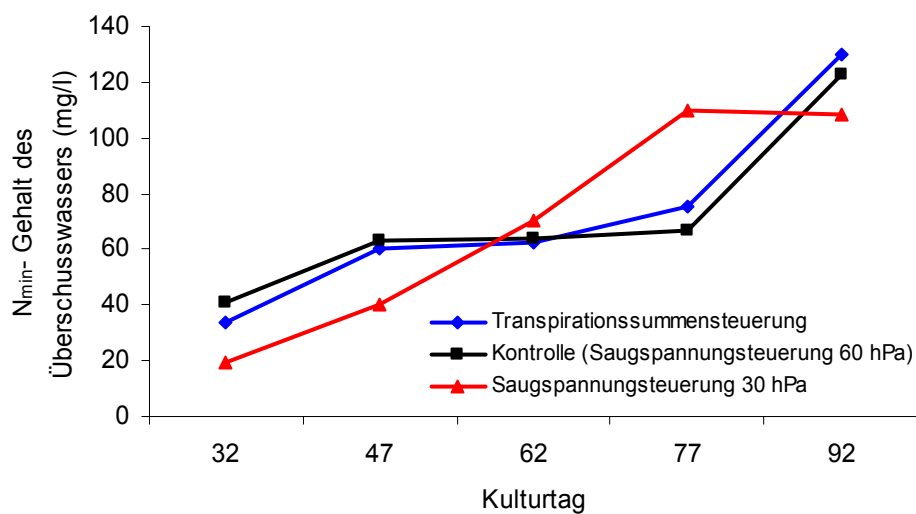


Abb. 52: Verlauf des  $N_{\min}$ -Gehaltes im Überschusswasser bei unterschiedlichen Steuerungsmethoden der Bewässerung bei *Lycopersicon esculentum*

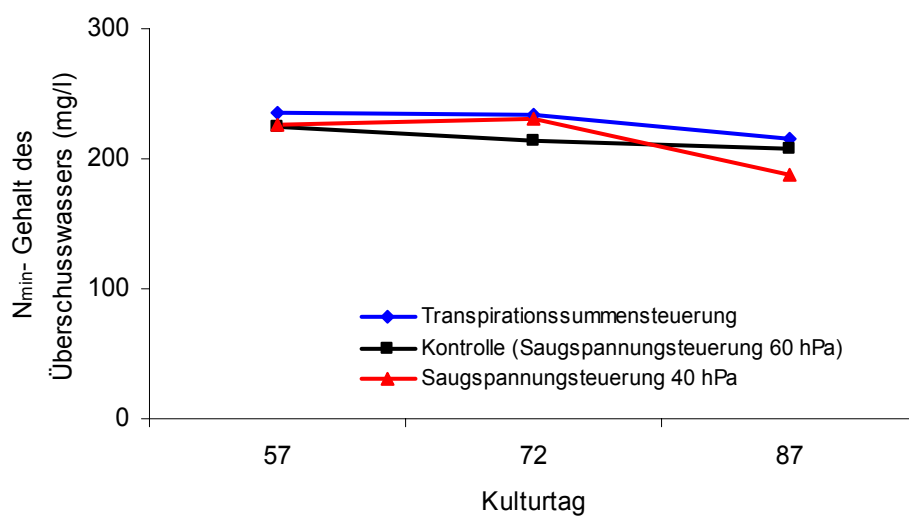


Abb. 53: Verlauf des  $N_{\min}$ -Gehaltes im Überschusswasser bei unterschiedlichen Steuerungsmethoden der Bewässerung bei *Cucumis sativus*

#### 4.7.2. EC- und pH-Werte im Drainagewasser und im Substrat

Anhand der täglich registrierten Temperatur-, pH- und EC-Werte der Nährlösung und der Überschusswassermengen wurden diese Werte für beide Kulturen dargestellt. Die EC des Substrates wurde aus dem Mittelwert der EC der Nährlösung und der Drainage berechnet (SONNEVELD, 1981 in: KLÄRING et al., 1998).

Für den *Lycopersicon esculentum* Bestand war die EC- und der pH-Wert der Nährlösung bei einem Durchschnitt von 2,2 dS/m und 6,3.

Im Überschusswasser der transpirationsgesteuerte Variante war die EC im Durchschnitt 2,3 dS/m, im Bereich zwischen 1,4 und 4,3 dS/m. In der 60 hPa Variante lag die EC der Überschusswassermengen zwischen 1,3 dS/m und 3,7 dS/m, mit einem Durchschnitt von 2,1 dS/m. Ähnliche Werte wie bei der 60 hPa Variante zeigte sich für die EC der Drainage bei der 30 hPa Variante. Eine starke Erhöhung der EC im Drainagewasser aller Steuerungsvarianten wurde ab den 40. Kulturtag beobachtet (Abb. 54 a, Tab. 17).

In den drei Steuerungsvarianten wurde ein ähnlicher Verlauf der EC im Substrat beobachtet. Diese war relativ stabil bei 2,3 dS/m und hatte einen leichten Anstieg ab dem 40. Kulturtag bis auf 3,0 dS/m (Abb. 54 a).

Der pH-Wert der Überschussmengen der Transpirationsvariante lag zwischen 6,4 und 7,3, mit einem Durchschnitt von 6,9. Der durchschnittliche pH-Wert der Überschussmengen der weiteren zwei Varianten betrug 6,8 und 7,0 entsprechend (Tab. 17). Eine leichte Erhöhung des pH im Drainagewasser der drei Steuerungsvarianten wurde ab dem 15. Kulturtag beobachtet (Abb. 54 b).

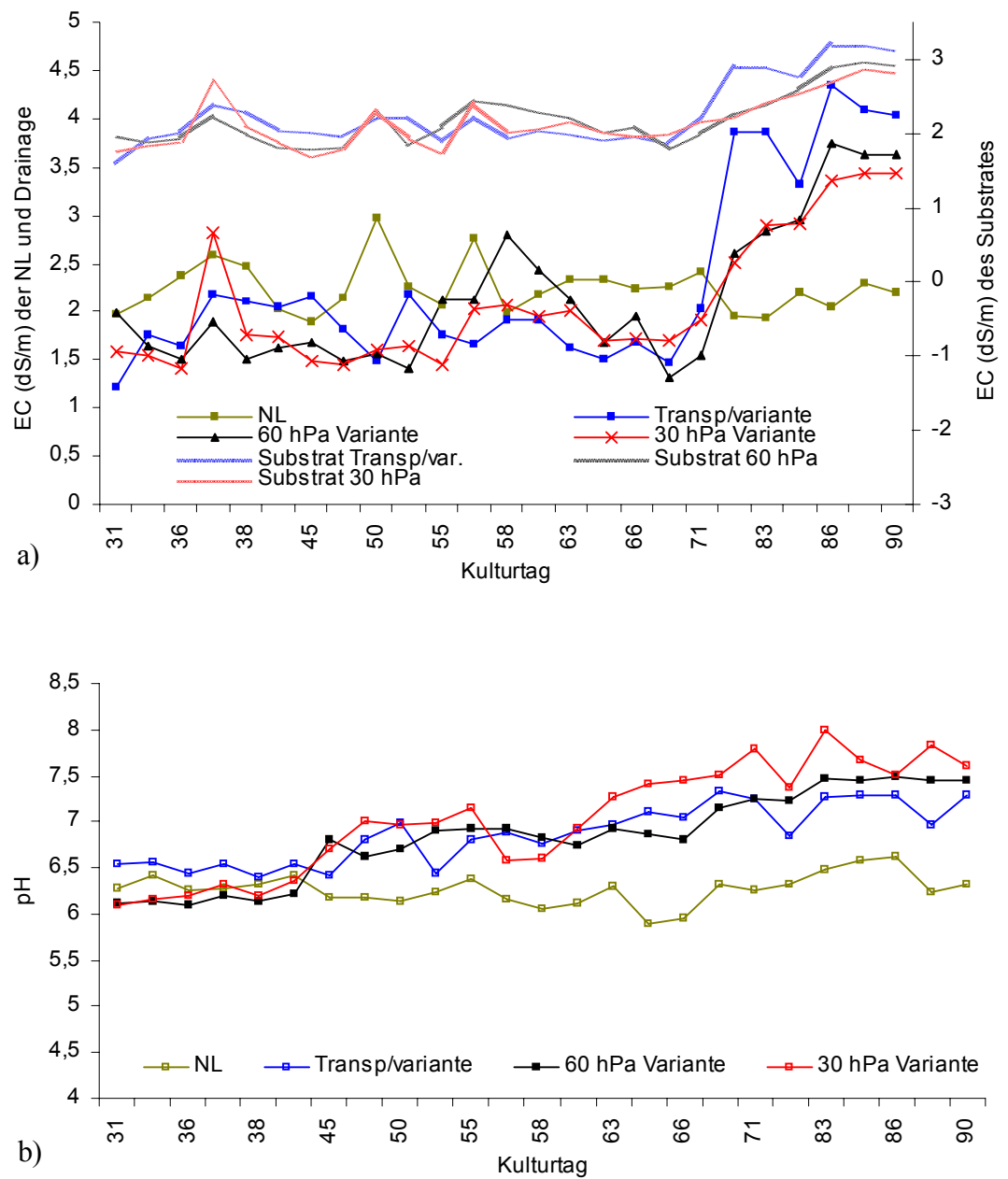


Abb. 54: Verlauf a) der EC der Nährlösung, des Drainagewasser und des Substrates und b) des pH bei drei Bewässerungssteuerungsmethoden bei *Lycopersicon esculentum*

Tab. 17: EC- und pH-Werte des Überschusswassers in drei Steuerungsmethoden bei *Lycopersicon esculentum* – EC- und pH-Werte der Nährlösung

(N=25)	Transp/variante	60 hPa Variante	30 hPa Variante	Nährlösung
<b>EC</b>				
Mtw.	2,3	2,1	2,1	2,2
Min-	1,4 – 4,3	1,3 – 3,7	1,4 – 3,4	1,9 – 3,0
cv%	41,9	34,4	31,9	11,6
<b>pH</b>				
Mtw.	6,9	6,8	6,6	6,3
Min-	6,4 – 7,3	6,1 – 7,5	6,1 – 7,1	5,9 – 6,6
cv%	4,6	6,9	8,4	2,7

Im *Cucumis sativus* Bestand war der EC- und pH-Wert der Nährlösung im Durchschnitt 2,6 dS/m und 6,2.

Im Überschusswasser der transpirationsgesteuerten Variante war die EC im Durchschnitt 4,2 dS/m, in einem Bereich von 2,5 bis 5,9 dS/m. In der 60 hPa Variante lag die EC der Überschusswassermengen zwischen 1,8 dS/m und 6,9 dS/m, mit einem Durchschnitt von 4,8 dS/m. Die Drainagemengen der 40 hPa Variante hatten einen EC-Wert zwischen 2,4 dS/m und 4,7 dS/m, mit einem Durchschnitt von 3,4 dS/m. Eine leichte Erhöhung der EC der Drainage wurde ab dem 65. Kulturtag bei der Transpirations- und der 60 hPa Variante beobachtet (Abb. 55 a, Tab. 18).

Die EC des Substrats verlief am Anfang der Kulturperiode bei den drei Steuerungsvarianten relativ stabil (im Durchschnitt 2,8 dS/m). Ab dem 65. Kulturtag lag diese bei der Transpirationsvariante und der 60 hPa Variante im Durchschnitt um 4,0 dS/m bzw. 4,2 dS/m. Ein niedriger Anstieg, im Durchschnitt 3,2 dS/m, wurde bei der 40 hPa Variante beobachtet (Abb. 55 a).

Der pH-Wert der Überschussmengen der Transpirationsvariante lag zwischen 5,2 und 7,6, mit einem Durchschnitt von 6,0. Der durchschnittliche pH-Wert der Überschussmengen der weiteren zwei Varianten war 6,1 (Abb. 55 b, Tab. 18).

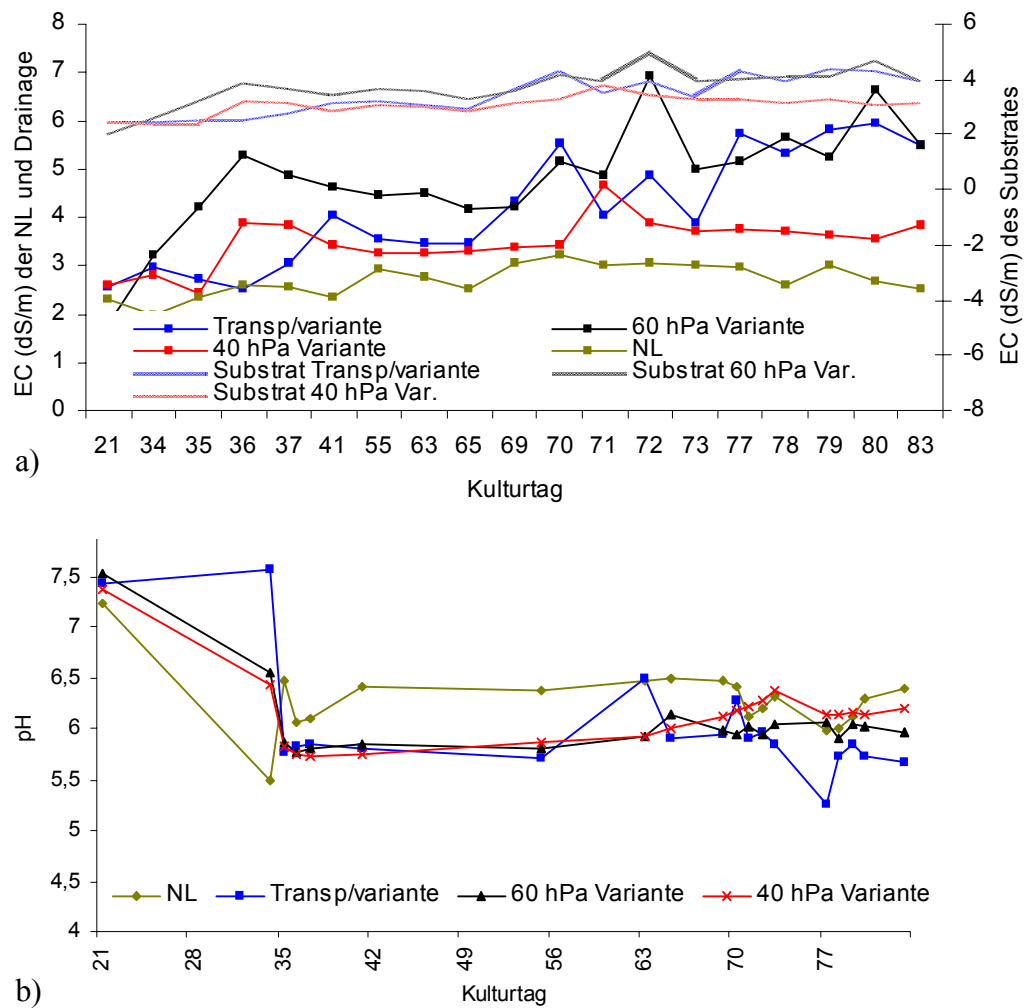


Abb. 55: Verlauf a) der EC der Nährlösung, des Drainagewasser und des Substrates und b) des pH bei drei Bewässerungssteuerungsmethoden bei *Cucumis sativus*

Tab. 18: EC- und pH-Werte des Überschusswassers in drei Steuerungsmethoden bei *Cucumis sativus*– EC- und pH-Werte der Nährlösung

(N=19)	Transp/variante	60 hPa	40 hPa	Nährlösung
<b>EC</b>				
Mtw.	4,2	4,8	3,4	2,6
Min-	2,5 – 5,9	1,8 – 6,9	2,4 – 4,7	2,0 – 3,2
cv%	28,4	23,3	16,5	15,2
<b>pH</b>				
Mtw.	6,0	6,1	6,1	6,2
Min-	5,2 – 7,6	5,9 – 7,5	5,7 – 7,4	5,4 – 7,2
cv%	9,5	6,1	5,9	7,9

#### 4.7.3. N<sub>t</sub>-Gehalt in Blättern, Stängeln und Früchten

Am Ende des Versuchs wurden Pflanzen (Blätter und Stängel)- und Fruchtproben, von zufällig ausgewählten Pflanzen der unterschiedlichen Varianten, entnommen. Dabei wurde das Gewicht jeder einzelnen Pflanze und Frucht registriert. Die Frischmasse wurde über 72 h in einem Ofen bei 60°C getrocknet. Das N<sub>t</sub> der Trockenmasse der Pflanzen und der Früchte wurde im Labor bestimmt und auf den gesamten Pflanzenbestand und Fruchtgehalt jeder Variante entsprechend hochgerechnet.

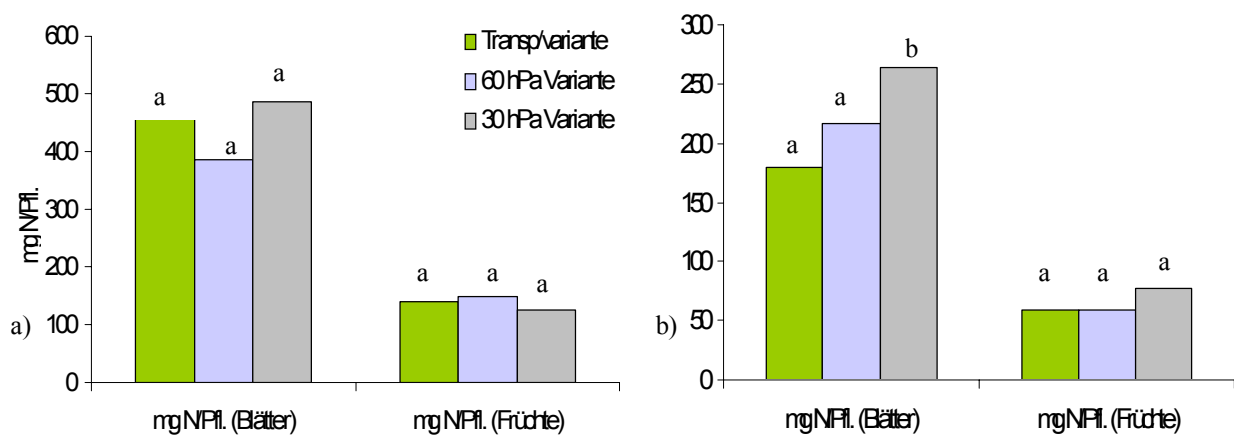


Abb. 56: Stickstoffgehalt in den Blättern, Stielen und Früchten bei a) *Lycopersicon esculentum* und b) *Cucumis sativus* Pflanzen unter drei Steuerungsvarianten der Bewässerung

Im *Lycopersicon esculentum* Bestand war der Stickstoffgehalt der Blätter und Früchte der Transpirationsvariante 458,1 mg N/Pflanze bzw. 139,7 mg N/Pflanze. In der 60 hPa Variante wurden entsprechend 385,3 mg N/Pflanze bzw. 149,2 mg N/Pflanze gemessen. Leicht höhere Werte wurden in den Blättern und Stängeln der 40 hPa Variante registriert: 485,1 mg N/Pflanze. Die Früchte dieser Variante enthielten 126,2 mg N/Pflanze (Abb. 56, a).

Im *Cucumis sativus* Bestand war der Stickstoffgehalt der Blätter und Früchte der Transpirationsvariante 179,2 mg N/Pflanze bzw. 58,3 mg N/Pflanze. In der 60 hPa Variante wurden entsprechend 216,7 mg N/Pflanze bzw. 58,3 mg N/Pflanze registriert. Leicht höhere Werte (263,9 mg N/Pflanze bzw. 77,8 mg N/Pflanze) wurden bei der 40 hPa Variante gemessen (Abb. 56, b).



## 4.8. Wassereffizienz in der Bewässerungssteuerung

### 4.8.1. Effiziente Stoffproduktion in der transpirationssummengesteuerten Bewässerung

Der Wassernutzungskoeffizient der Produktivität  $WUE_P$ , bezogen auf den gesamten Pflanzenbestand, wurde für *Lycopersicon esculentum* (vgl. Kap. 4.6.1.) und *Gerbera jamensonii* (vgl. Kap. 4.6.2.) berechnet. Als organische Trockensubstanzproduktion wurde die Bestandsproduktionsleistung (CGR; crop growth rate) aus der laubbezogenen Assimilationsleistung der einzelnen Pflanzen (ULR) und dem LAI des Pflanzenbestands berechnet (LARCHER, 1999). Aus den gemessenen Photosyntheseleistungsdaten ( $\text{mmol/m}^2\text{s}$ ) wurden die wöchentlichen Photosynthesesummen berechnet und in Trockensubstanz (g) umgerechnet. Der  $WUE_P$  ist das Verhältnis der Bestandsproduktion zu den im gleichen Zeitraum pflanzlichen Wasserumsätzen des Bestands.

Die Produktionsleistung der beiden Kulturen war in den ersten Wochen der Kulturperiode höher (Abb. 57 a, b). Der durchschnittliche  $WUE_P$  für *Lycopersicon esculentum* betrug  $2,3 \text{ g TS/kg H}_2\text{O}$ . Ein hoher Wassernutzungskoeffizient der Produktivität ergab sich in den ersten Kulturwochen bei *Gerbera jamensonii*, mit einem durchschnittlichen Wert von  $15,4 \text{ g TS/kg H}_2\text{O}$ . Bei der Blütenentwicklungsphase schränkte sich der  $WUE_P$  auf  $3,2 \text{ g TS/kg H}_2\text{O}$  im Durchschnitt ein.

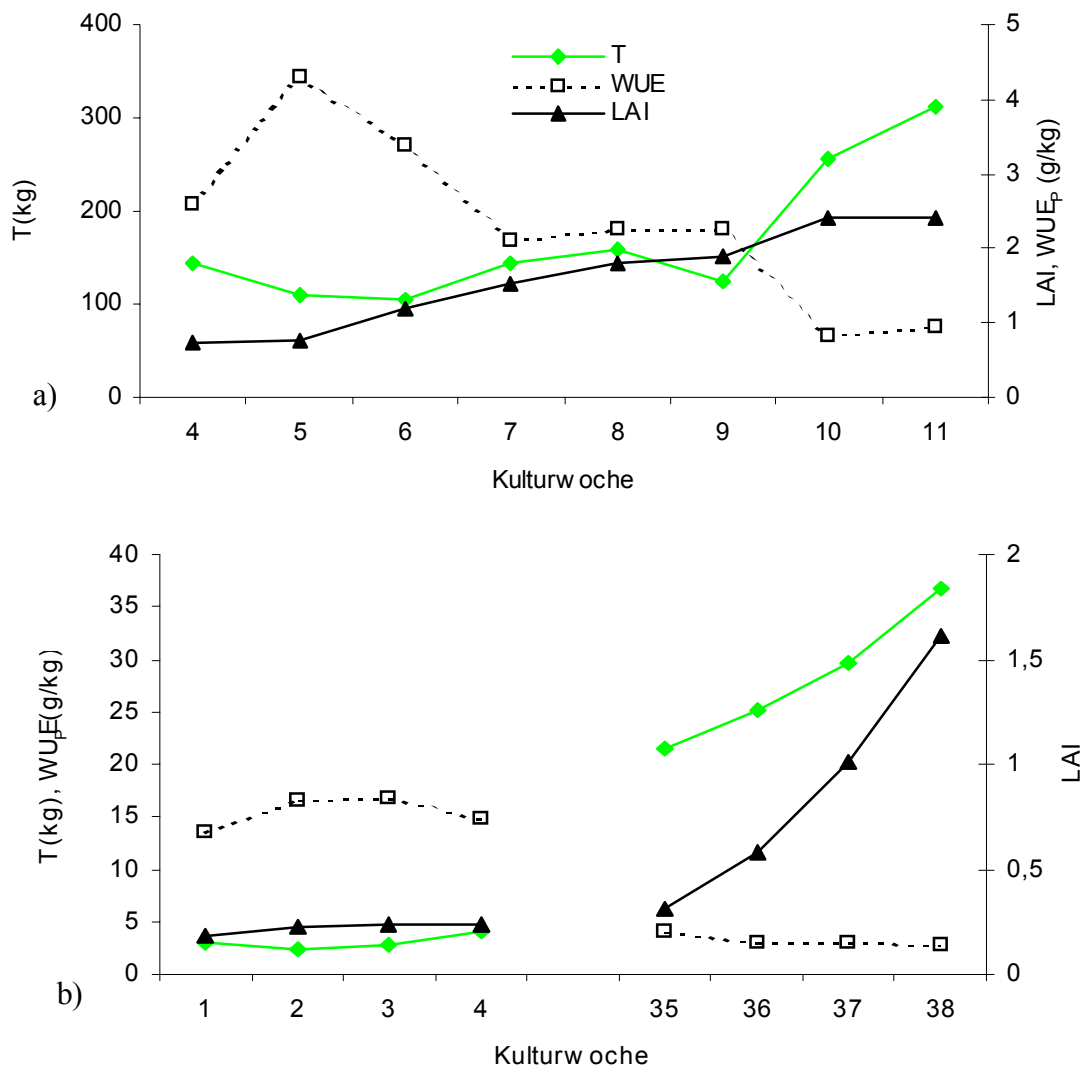


Abb. 57: Der Wassernutzungskoeffizient der Produktivität, die Transpiration und der LAI im Verlauf der Kulturperiode bei a) *Lycopersicon esculentum* und b) *Gerbera jamensonii*

#### 4.8.2. Produktivität und Pflanzenwachstum

Zur Beurteilung des effizienten Wassereinsatzes in einer nach gemessenen Transpirationssummen gesteuerten Bewässerung, wurden in der Versuchsdurchführung (vgl. Kap. 4.6.1.; 6.2.; 6.3. und 6.4.) wöchentlich die Pflanzenhöhe und die Blattanzahl von acht zufällig ausgewählten Pflanzen in jeder Steuerungsvariante aufgenommen. Aus der Registrierung des Ertrags nach marktfähigen und nicht marktfähigen Früchten wurde für jede Steuerungsvariante der Wassernutzungskoeffizient des gesamten Ertrags  $WUE_{Et}$  (kg/l oder Stck./l) und des marktfähigen Ertrags  $WUE_{Em}$  (kg/l oder Stck./l) berechnet.

#### 4.8.2.a Bewässerung mit definierter Drainagemenge

In der Versuchsdurchführung von *Lycopersicon esculentum* (vgl. Kap. 4.6.1.) Pflanzen wurde das Ernteprodukt nach dem Gewicht der einzelnen Frucht, wie auch die Anzahl der Früchte/Pflanze, registriert. Die zweifaktorielle Varianzanalyse wurde für jede Pflanzengröße durchgeführt. Es wurden keine Wechselwirkungen zwischen der Steuerungsmethode und der Sorte festgestellt. Der gesamte Ertrag der Sorte „Bolero“ unter transpirationssummengesteuerter Bewässerung war 2,1 kg/m<sup>2</sup> und unter saugspannungsgesteuerter Bewässerung 2,5 kg/m<sup>2</sup>. Entsprechend war der Ertrag der Sorte „Rondello“ 2,3 kg/m<sup>2</sup> bzw. 2,2 kg/m<sup>2</sup>. Der gesamte Ertrag der Transpirationsvariante, unabhängig von der Tomatensorte, war 4,4 kg/m<sup>2</sup> und der der Saugspannungsvariante 4,7 kg/m<sup>2</sup>. Der Anteil der marktfähigen Früchte war 77,9 % bzw. 78,9 %. Die saugspannungsgesteuerte Variante ergab einen WUE<sub>Et</sub> von 0,15 kg/l im Vergleich zu 0,10 kg/l der transpirationssummengesteuerten. Entsprechend waren die Werte des WUE<sub>Em</sub> 0,13 kg/l und 0,09 kg/l (Tab. 19).

Tab. 19: Ertrag und Pflanzenwachstum von zwei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei zwei *Lycopersicon esculentum* Sorten (Mittelwerte in der gleichen Zeile mit dem gleichen Buchstaben differieren nicht signifikant bei 0,05 P nach der ANOVA Analyse)

	Transpirations- summensteuerung		Saugspannung- steuerung 50 hPa	
	„Bolero“	„Rondello“	„Bolero“	„Rondello“
Gesamter Ertrag (kg/m <sup>2</sup> )	2,1a	2,3a	2,5a	2,2a
Marktf. Ertrag (kg/m <sup>2</sup> )	1,6a	1,8a	1,9a	1,9a
Nicht marktf. Ertrag (kg/m <sup>2</sup> )	0,5a	0,3b	0,6a	0,3b
Durchschnittlicher marktf. Fruchtgewicht (g)	86,1a	97,5b	90,9a	103,2b
Früchte pro Pflanze	28,9a	25,6b	28,6a	23,1b
Pflanzenhöhe (cm)	116a	117a	116a	118a
Blattanzahl	17,0a	19,3a	17,7a	20,3a

Die Blüten der *Gerbera jamensonii* (vgl. Kap. 4.6.2.) Pflanzen wurden nach der Steuerungsvariante und der Sorte registriert. Zur Qualitätscharakterisierung wurden 5 Kategorien festgesetzt (1 bis 5). Die Blüten wurden nach dem Blütendurchmesser und dem Stängelbild (gerade/krumm, einfach/doppelt) in den Kategorien unterteilt. Als 1. Kategorie wurden die Blüten mit großem Diameter und geradem, einfachem Stiel charakterisiert. Als marktfähig stellten sich die Blüten der 1., 2., und 3. Kategorie heraus. Die zweifaktorielle Varianzanalyse wurde für jede Pflanzencharakteristika durchgeführt. Es wurden keine Wechselwirkungen zwischen der Steuerungsmethode und der Sorte festgestellt. Der gesamte Ertrag der Sorte „Molina“ unter

transpirationssummengesteuerter Bewässerung war 0,9 Stck./Pflanze und unter zeitgesteuerter Bewässerung 0,7 Stck./Pflanze. Der Ertrag der Sorte „Lilabella“ war entsprechend 0,7 Stck./Pflanze und 0,6 Stck./Pflanze. Der gesamte Ertrag der Transpirationsvariante, unabhängig von der Tomatensorte, war 1,6 Stck./Pflanze und der der Zeitvariante 1,5 Stck./Pflanze. In der Transpirationsvariante war der Anteil der marktfähigen Blüten 66,4 % bzw. 66,7 %, in der zeitgesteuerten Variante bei 17,6% bzw. 0% (Tab. 20).

Tab. 20: Ertrag und Pflanzenwachstum von zwei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei zwei *Gerbera jamensonii* Sorten (Mittelwerte in der gleichen Zeile mit dem gleichen Buchstaben differieren nicht signifikant bei 0,05 P nach der ANOVA Analyse)

	Transpirations- summensteuerung		Zeitsteuerung	
	„Molina“	„Lilabella“	„Molina“	„Lilabella“
Gesamter Ertrag (Stck./Pfl.)	0,87 a	0,75 a	0,68 b	0,56 b
Marktf. Ertrag (Stck./Pfl.)	0,56 a	0,5 a	0,12 b	0,0 b
Nicht marktf. Ertrag (Stck./Pfl.)	0,31 a	0,25 a	0,56 b	0,56 b
Stängellänge (cm)	55,3 a	63,1 b	54,5 a	62,7 b
Blattanzahl	9,5 a	10,5 a	8,5 a	9,3 a

#### 4.8.2.b Bewässerung mit minimaler Drainagemenge

Die Ernte der Tomatensorte „Prospero“ erfolgte zum Versuchenden (vgl. Kap. 4.6.3). Pro Pflanze wurden die Anzahl und das Gesamtgewicht aller gebildeten Früchte, unabhängig der Größe und Reife, registriert.

Der gesamte Ertrag der transpirationsgesteuerten Variante betrug zum Zeitpunkt des Versuchendes 0,85 kg/m<sup>2</sup>. Dabei wurden 0,95 kg/m<sup>2</sup> in der 60 hPa Variante und 0,8 kg/m<sup>2</sup> in der 30 hPa Variante registriert. Etwas schwerer waren die Früchte der 60 hPa Variante, mit einem durchschnittlichen Gewicht von 27,6 g pro Frucht. In der transpirationsgesteuerten Variante ergab sich das Durchschnittsgewicht der Früchte von 21,6 g und in der 30 hPa Variante von 24,9 g. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch aus dem Verhältnis der Anzahl der Früchte zur Pflanze (Abb. 58).

Die effiziente Nutzung des Wassers in Bezug auf die Ertragsmenge wurde für jede Bewässerungsvariante berechnet. Für die transpirationsgesteuerte und die 60 hPa Variante ergab sich ein WUE<sub>Et</sub> von 0,014 kg/l bzw. von 0,016 kg/l. Eindeutig niedriger war der Wert bei der 40 hPa Variante: nämlich 0,01 kg/l.

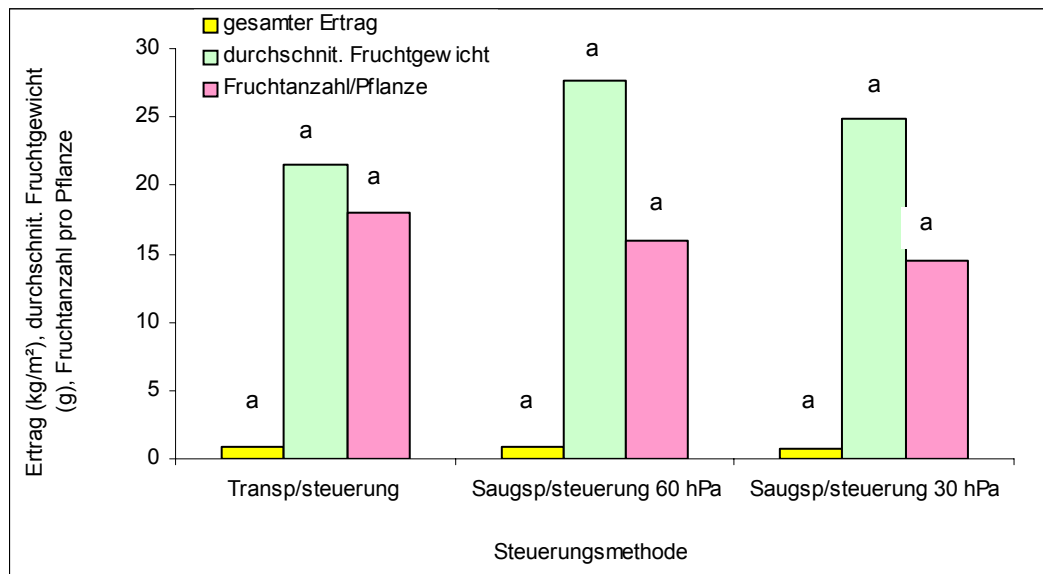


Abb. 58: Vergleich des gesamten Ertrages, des durchschnittlichen Fruchtgewichtes und der Fruchtanzahl pro Pflanze zwischen den drei Steuerungsvarianten bei *Lycopersicon esculentum* (ANOVA, 5 % P)

In Tab. 21 wird der Einfluss der unterschiedlichen Steuerungsmethoden auf die qualitativen und quantitativen Eigenschaften der *Cucumis sativus* (vgl. Kap. 4.6.4.) Kultur dargestellt. Alle geernteten Früchte waren marktfähig.

Tab. 21: Ertrag und Pflanzenwachstum von drei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei *Cucumis sativus* (Mittelwerte in der gleichen Zeile mit dem gleichen Buchstaben differieren nicht signifikant bei 0,05 P nach der ANOVA Analyse)

	Transpiration- steuerung	Saugspannung- steuerung 60 hPa	Saugspannung- steuerung 40 hPa
Gesamter Ertrag (kg/m²)	0,7a	0,7a	0,8a
Durchschnittlicher Fruchtgewicht (g)	95,3a	125,4a	124,9a
Früchte pro Pflanze	3,3a	2,6a	3,1a
Durchschnittliche	250a	240a	261a
Pflanzenhöhe (cm)			
Blattanzahl/Pflanze	21,0a	21,8a	22,0a

Der gesamte Ertrag der transpirationsgesteuerten Variante betrug 0,7 kg/m², im Vergleich zu den 0,7 kg/m² der 60 hPa Variante und den 0,8 kg/m² der 30 hPa Variante. Etwas schwerer waren die Früchte der 60 hPa Variante mit einem durchschnittlichen Gewicht von 125,4 g/Frucht. In der transpirationsgesteuerten Variante ergab sich ein Durchschnittsgewicht der Früchte von 95,3 g/Frucht und in der 30 hPa Variante von 124,9 g/Frucht. Die Transpirationsvariante ergab mehrere, aber leichtere Früchte als die anderen zwei Varianten (Tab. 21). Die effiziente Nutzung des Wassers in Bezug auf die Ertragsmenge wurde für jede

Bewässerungsvariante berechnet. Für die transpirationsgesteuerte und die 60 hPa Variante ergab sich ein  $WUE_{Et}$  von 0,046 kg/l bzw. von 0,048 kg/l. Eindeutig niedriger lag der Wert mit 0,024 kg/l bei der 40 hPa Variante.

---

## 5. DISKUSSION - SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 5.1. Phytomonitoringtechnologie im Optimierungsprozess der Produktion

Durch die *Phytomonitoringtechnologie* erhält der Produzent eine große Anzahl an physiologisch relevanten Daten, die eine rechtzeitige Reaktion auf Stresssituationen der Pflanze ermöglichen. Phytometrische Daten wie z.B. die Mittagsdepression des Stängelflusses, die tägliche Schrumpfung oder Expansion des Stängeldurchmessers, die Temperaturdifferenzen der Früchte oder der Blätter zu den Umgebungstemperaturen können als Hinweisgrößen für die Bewertung der Mikroklimabedingungen dienen. Danach kann kontrolliert werden, ob die Reaktion des Produzenten auf mögliche Stresssituationen angemessen war. Der aktuelle Zustand der Pflanze, ebenso wie die Langzeitentwicklung der Pflanze, können messtechnisch direkt erfasst werden. Im Kontrast zum „Speaking Plant“-Konzept wird hier nicht hauptsächlich auf die Messung von Pflanzendaten abgehoben, sondern die Abschätzung von Pflanzenstresskonditionen vorgenommen (TON et al., 2001).

Die Veränderungen der klimatischen Bedingungen, wie auch die der Nährstoff- und Wasserversorgung, welche die Pflanzenentwicklung beeinflussen, können antizipiert werden. Es findet eine nicht-destruktive physiologische Untersuchung statt, bei der Informationserfassungssysteme eine kontinuierliche Langzeitbeobachtung an der Pflanze vornehmen (LIALIN, 1993 in: BRAZAITYTE, 2000). Der *Phytomonitor* übernimmt die Funktion des Wächters, der über auftretende Probleme informiert. Dem Verbraucher stehen auch komplexe Phytomonitoringsysteme zur Verfügung, wie z.B. die POL-Box, die LPS-03 und die Ekoplant-011 (MANZANTI HANSEN et al., 1998; BRAZAITYTE et al., 2000; BRAZAITYTE et al., 2000), die es ermöglichen, an einer oder mehreren Pflanzen eines Bestandes mehrere physiologische Parameter parallel zu erfassen.

Die Forderung nach zusätzlichen Sensoren innerhalb des Phytomonitoring-Konzeptes ist kosten- und arbeitsintensiver für den Anbauer. Da die Genauigkeit der Messungen höhere Anforderungen an weitere technische Systeme im Gewächshaus stellt, müssen die Daten möglichst präzise gemessen werden und aus den so

gewonnenen neuen Informationen Entscheidungshilfen abgeleitet werden, welche die tatsächlichen Bedürfnisse der Pflanze widerspiegeln.

Diese nicht immer störungsfreien Messmethoden sind nicht für alle Kulturarten und Kulturverfahren geeignet. Die Anbringung der Sensoren am Messort (Pflanze) ist aufwändig und verlangt Zeit, Geschick und technisches Wissen. Da zur Messung des Pflanzenwasserzustands nur einzelne Pflanzen oder Pflanzenteile verwendet werden können, wird die Repräsentativität des Messortes in Frage gestellt, was die Übertragbarkeit der gemessenen Daten auf Bestandsbedingungen erschwert. Die Verteilung von mehreren Sensoren im Bestand ist nach wie vor ökonomisch unvorteilhaft.

Die indirekten Messmethoden ermitteln pflanzliche Reaktionen und Effekte, sobald Wasserstress eintritt. Pflanzenbewegung, Temperatureinfluss, Wachstum und Reaktionen der Pflanzen, die nicht auf Wasserstresssituationen zurückzuführen sind, beeinflussen zudem negativ die Zuverlässigkeit der Messdaten.

## **5.2. Bewertung der ausgewählten Messtechnik**

### **5.2.1. Bewässerungsregelung durch Einsatz des Tensiometers**

Häufig werden im Gewächshausanbau Tensiometer als Regelsensoren zur automatischen Bewässerung eingesetzt. Die Saugspannung bzw. das Matrixpotenzial des Substrates ist als Führungsgröße zur Steuerung der Bewässerung unterschiedlicher Gemüsearten geeignet. Das Pflanzenwachstum sowie auch die sich verändernden Klimabedingungen werden bei der Messung der Bestandsumsätze berücksichtigt. Im Vergleich zu den klimatischen Parametern (Strahlung,  $VPD_i$ ,  $VCD_{i-b}$ ) eignet sich das Matrixpotenzial besser als Steuerungsgröße (BECK, 2000). Die aktuelle Boden- bzw. Substratfeuchte kann direkt und kontinuierlich ermittelt werden, was eine schnelle Erkennung von Trockensituationen im Wurzelbereich und daraus folgenden Wasserstresssituationen der Pflanze ermöglicht.

Dabei ist die Repräsentativität der Messwerte eingeschränkt. Die Tensiometrie bietet eine punktuelle Messung der Saugspannung (vgl. 3.4.1). Um eine Aussage über die Wasserumsätze des gesamten Bestandes zu ermitteln, ist eine Mehrzahl von Sensoren im Bestand einzusetzen, was kostenintensiv ist (RIVIERE et al., 1999). Der unterschiedliche Saugspannungsverlauf an zwei oder mehr Standorten des gleichen Bestandes von *Capsicum annum* (Abb. 21) und *Lycopersicon*



*esculentum* (Abb. 22, 23, 42, 48) beweist die eingeschränkte Aussagekraft der Messwerte über den gesamten Bestand. Auch nach erfolgtem Anstau (Anstauverfahren) bei einer Topfkultur von *Pelargonium-Zonale* Hybriden konnten erheblichen Abweichungen der Saugspannung in den einzelnen Töpfen nicht vermieden werden (STEINBACHER et al., 1995).

Die vom Tensiometer „4“ (Abb. 22) erfassten Extremwerte der Saugspannung weisen auf einen Kontaktabbruch zwischen Sensor und Boden hin. Durch Schrumpfung und Sackung des Substrates kann es zu solchen Störungen kommen (GIELING, 1998; BECK, 2000). Eine häufige Kontrolle der Funktionsfähigkeit der Sensoren ist erforderlich (PASCHOLD et al., 1999; BECK, 2000), was den Arbeitsaufwand erhöht.

Tensiometer sind nicht bei allen Substratarten (SCHREVEENS et al., 1992) und in allen Kulturverfahren (z.B. Aeroponik, NFT-Verfahren) einsetzbar. Im Anbau mehrerer Pflanzenarten in einem Gewächshaus müssen mehrere Sensoren eingesetzt werden, um die Bewässerungssteuerung jeder einzelnen Pflanzenart getrennt zu führen.

Die Messung des Wasserpotenzials im Wurzelbereich gibt zwar ein kontinuierliches Bild der pflanzlichen Wasserumsätze, hat aber keine Aussagekraft über die erforderliche Menge der Bewässerung. Durch die Beobachtung der Bodenfeuchtigkeit muss die Schaltschwelle der Bewässerung manuell geändert werden, um nassen Verhältnissen im Bodenbereich zu verhindern und die Drainagemengen zu kontrollieren. In der mit Hilfe der Tensiometrie gesteuerten Bewässerung von *Capsicum annum* wurden in der Nachtperiode hohe Transpirationssummen zwischen zwei Gießtakten gemessen (> 12 l). In den strahlungsreichen Tageszeiten wurden kürzere Bewässerungszyklen und gleichmäßige Transpirationssummen (4 bis 5 l) registriert (Abb.34, Tab. 7). Die Messung des Matrixpotenzials ist geeignet zur kontinuierlichen Überwachung und Registrierung der Wasserumsätze eines Bestandes über längere Zeitperioden, macht jedoch keine ausreichenden Aussagen für die tatsächlichen Wasseranforderungen des Bestandes.

### **Schlussfolgerungen:**

Die Bewässerungssteuerung von Pflanzenbeständen anhand der im Substrat herrschenden Saugspannung ist derzeit die bevorzugte Methode. Obwohl die

Tensiometrie eine schnelle und aktuelle Übertragung des Bodenwassergehalts zur Verfügung stellt, ist sie mit Schwächen behaftet (Repräsentativität der Messwerte für den gesamten Bestand, Messunsicherheiten durch exogene Störungen u.a.). Demzufolge ist die Messung des Matrixpotenzials als Führungsgröße der Steuerung für eine exakte Bewässerung nach den pflanzlichen Anforderungen nicht ausreichend.

### **5.2.2. Bestimmung der pflanzlichen Wasserumsätze durch die Saftflussrate**

Zur Ermittlung des Saftflusses im Xylem führen die Methoden der Wärmebilanz (THB) zu exakteren Resultaten als die Methoden der Wärmepulsgeschwindigkeit (HPV). Dabei stellen die THB-Methoden höhere Anforderungen an die Messtechnik (SWANSON, 1994). Da die Transpiration 80-90 % des aufgenommenen Wassers wieder freigibt, kann sie bei einigen Pflanzen aus dem Wasserfluss ermittelt werden, wenn man einen Standardfehler von 8 % berücksichtigt (ISHIDA et al., 1991). Die Transpiration der Pflanzen wird durch die Messtechnik nicht beeinträchtigt und Langzeitmessungen sind möglich (WEIBEL et al., 1995). Diese Methoden wurden bislang in Freilandkulturen und in Einzelfällen im Gemüseanbau eingesetzt (CHOI et al., 1999).

Das Messprinzip der SF-Sensoren des LPS-03 Phytomonitors basiert auf der THB-Methode. Die Sensoren sind einfach zu installieren und nicht sehr teuer. Im Gegensatz zu den modernen Wärmebilanzmethoden bieten die SF-Sensoren relative Messungen des Stängelflusses. Sie sind einfacher zu handhaben und die Ermittlung der Daten ist nicht kompliziert. Die Messmethode hat eine hohe Dynamik (PHYTECH, 1998). Die Installation des Sensors am Blattstiel ermöglicht die Ermittlung der Wasserumsätze des Bestandes unter Berücksichtigung der Pflanzenentwicklung. Die kontinuierliche Messung der Saftflussrate am Blattstiel entspricht der Verdunstungsmenge des sich darüber in seiner Entwicklungsphase befindenden Blattes.

Die Sensoren sind zerbrechlich, empfindlich (Störungen durch Berührung) und erfordern eine intensive Wartung (häufige Inspektion aufgrund Verschmutzungen oder Installationsstörungen). Sie sind nur begrenzt, entsprechend dem Stängeldurchmesser, einsetzbar. Besonders bei Pflanzen mit kleinen Stängeldurchmessern oder mit kleinen Knotenabständen (Container- und Topfpflanzen) ist der Einsatz problematisch (RIVIERE et al., 1999). Die Proportionalität zwischen

tatsächlichem Saftfluss und Ausgangssignal des Sensors ist für die SF-Sensoren limitiert. Es wird eine obere Begrenzung des Flusses von 3 ml/h (eine Transpirationsrate von nicht mehr als 6 ml/h pro dm<sup>2</sup> Blattfläche) angegeben. Um diesen Grenzwert nicht zu überschreiten wird empfohlen, dass die Blattfläche oberhalb des Sensors nicht über 50 cm<sup>2</sup> beträgt (PHYTECH, 1998). Dies allerdings begrenzt die Repräsentativität des Messstandortes für den gesamten Bestand. Das Problem der Repräsentativität entfällt durch die Ermittlung von Relationswerten des Saftstromtrends im Transpirationsprozess.

Aus den parallelen Messführungen der Gaswechsel- und Wärmebilanzmethode am gleichen Pflanzenbestand (vgl. 4.4.3) wurde über eine längere Periode eine gute Übereinstimmung des Transpirations- und des Saftflussverlaufes beobachtet. Ein Rückgang des Saftflusses wurde in zwei Mittagszeiten, trotz steigender Einstrahlung und Dampfdruckdifferenz, beobachtet. Laut Literatur soll jedoch in den Mittagsstunden die Saftflussrate den Verlauf der Globalstrahlung außerhalb adaptieren (VAN DE SANDEN et al., 1992). Die Beeinträchtigung der Sensoren durch Umweltfaktoren ist zu berücksichtigen. Um genaue Messergebnisse zu erhalten, sollte sichergestellt werden, dass Stängel und Messgerät von den Umwelteinflüssen isoliert sind (ROSE et al., 1998). Die Korrelation des Saftflusses zur Transpiration ist gering, wenn starke Temperaturschwankungen herrschen (BRAZAITYTE et al., 1999; LÖSCH, 2001). Gewisse Abweichungen (höhere Saftflussraten) treten aufgrund von Wasseraufnahme für das Wachstum und wegen Veränderungen im Wassergehalt der Pflanzen auf (VAN DE SANDEN et al., 1992). Zu berücksichtigen sind auch die kurzfristige Osmoregulation zwischen den Schließzellen und den Nebenzellen in der Mittagsperiode („Mittagsdepression“ – vgl. Abb. 11) und die durch den Phloemfluss Entladung von Zuckermengen an den Früchten, die deren osmotisches Potenzial erhöht und somit zu einem gerichteten Lösungstransport von den Früchten zu den Wurzeln (durch das Phloem) führt (LÖSCH, 2001).

### ***Schlussfolgerungen:***

Die Ermittlung der pflanzlichen Wasserumsätze durch Messung der Saftflussrate am Blattstiel ist vergleichbar mit der Gaswechselmethode. Die Ermittlung des Transpirationssogs als Trendwert der Saftflussrate ist vorteilhaft, da keine Interpolation der Messwerte auf den gesamten Bestand nötig ist. Nachteilig sind der

eingeschränkte Einsatz und die Empfindlichkeit der Sensoren, sowie ihre Beeinträchtigung von Klimafaktoren.

### **5.2.3. Direkte Transpirationsmessung durch die Gaswechsellmethode**

#### **5.2.3.a *Repräsentativität und Exaktheit der Messwerte***

In einem Gaswechsellmessverfahren ist für die Messung von aktuellen Pflanzendaten die Erhaltung eines, wie in der freien Gewächshausluft herrschenden, Klimas in der Küvette notwendig (PICKERING et al., 1993). Durch eine geeignete Dimensionierung (Größe, Länge, Querschnitt und Anzahl) der Blattküvetten des EPM-Messgerätes, wie auch durch die Auswahl eines geeigneten Materials (Kunststoff mit hoher Durchlässigkeit für die kurzwellige und langwellige Strahlung), wird die Bildung eines unerwünschten Küvettenklimas verhindert. Die Anzahl der angeschlossenen Blattküvetten ist frei wählbar und wird durch Eingabe in das Messprogramm softwareseitig berücksichtigt. Ein mechanischer Stress an Blattteilen ist ausgeschlossen, da der Küvettenrand mit einer flexiblen Schaumstoffdichtung abgedichtet ist. Die mittels Magneten an den Blättern angebrachten Küvettenhälften sollten regelmäßig kontrolliert werden, um eventuelle Ausfälle der Messung rechtzeitig verhindern zu können. Es erfolgt eine störungsfreie Messung im Gewächshaus, ohne Beeinträchtigungen aus den Klima- und Bodenkonditionen oder aus den Kulturarbeiten. Die technische Gestaltung des Messgerätes (Trockenfilter in Dewarkammern) schließt die Verschmutzung der Messsensoren aus (SCHMIDT, 1998).

Durch die Erwärmung der Luftströme im Messgerät wird die Messungenauigkeit der kapazitiven Feuchtemessung im Bereich über 95 % relative Luftfeuchte (Kondensationsbildung) aufgehoben (Abb. 17). Um hohe Auflösungen der gleichzeitigen Transpirations- und Photosynthesemessung zu erreichen, wird das Verhältnis von Pumpenförderungsleistung zu bemessener Blattfläche zwischen 80 und 120 cm<sup>3</sup>/s je 360 cm<sup>2</sup> Blattspreite, d.h. 0,05 ... 0,22 cm<sup>3</sup> Luft / (s cm<sup>2</sup> Blattspreite) festgelegt (Abb. 18).

Die Dynamik des Messverfahrens ist hoch. Die Daten werden in einem Zeitraster von 1 s gemessen und gespeichert. Um die daraus folgenden hohen Datenmengen zu reduzieren, ist es möglich, die Daten in längeren Zeitabständen (5 min Takt) als Mittelwert zu speichern.

Die Messung der Verdunstungsleistung durch die auf dem Küvettenprinzip basierende Gaswechselform zeigt eine hohe Genauigkeit an. Die an Fließpapier durchgeführten Phantommessungen an jeder einzelnen Blatküvette zeigten, dass die Messung der Verdunstung einen geringen systematischen Fehler bildet. Der aus den acht Küvetten gebildete Mittelwert der kumulativ berechneten Verdunstungsmengen stimmte mit der vorbestimmten Eintropfmenge überein (Abb. 24). Auch bei fortlaufenden Wiederholungen der Messung zeigte sich eine gute Übereinstimmung der vorgegebenen Eintropfmenge (10 ml) zu der kumulativen Verdunstungsmenge. Der systematische Fehler der Messung lag bei 5,8 % (Abb. 25).

Die Überprüfung der Messmethode bei *Lycopersicon esculentum* Pflanzen an zwei Standorten mit den gleichen Konditionen (Klimabedingungen, Bewässerung, Anbauverfahren) wurde, zur Beobachtung von eventuellen Transpirationsleistungsunterschieden im gleichen Bestand, durchgeführt. Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation zwischen den gemessenen Transpirationsmassenstromdichten der zwei Standorte war 0,95 (Abb. 27). Eine gleich hohe Korrelation (0,99) zeigten auch die an den zwei Standorten gemessenen Nettophotosyntheseleistungen (Abb. 28). Inhomogene Bestandestranspirations- und Nettophotosyntheseleistungsmessungen können somit vernachlässigt werden. Dies entspricht auch den Ergebnissen von HEISSNER (1997).

Andererseits wird die Gaswechselintensität jedes einzelnen Blattes durch das Alter und der räumlichen Anordnung beeinflusst (CHASON et al., 1991 in: VILLAGRA et al., 1995). Sich entwickelnde Blätter weisen andere Photosyntheseleistung auf als vollentwickelte oder alternde Blätter (GLOVER, 1974; MARSHALL et al., 1980 b). Die Nettophotosynthese des 5. Blattes der oberen Blattschicht einer Tomatenpflanze ist z.B. höher als die des 10. Blattes (XU et al., 1997). Die Licht- und Strahlungskonditionen variieren in den Blattschichten des Bestandes. Blätter im unteren Bereich der Pflanzendecke zeigen eine niedrigere Transpirations- und Photosyntheseleistung als die im oberen (XYLOYIANNIS et al., 2000). Mit zunehmender Pflanzendichte nimmt die Transpirationsintensität der Einzelblätter ab (Abb. 60), obwohl der LAI-Wert zunimmt. Das Verhältnis der Transpiration zur eingetroffenen Strahlung wird ebenso von der Blattfläche der Kultur beeinflusst (STANGHELLINI, 1993). Notwendige Pflege- und Schnittmaßnahmen bei *Cucumis sativus*, *Lycopersicon esculentum* und *Capsicum annuum* Kulturen hatten einen

Einfluss auf die aktuelle Blattfläche (BECK, 2000). Nach Angaben von XU et al., (1997) können Blätter, die tiefer als das 18. Blatt sitzen, entfernt werden, um bessere Luftzirkulation zu erschaffen.

Obwohl das EPM Gaswechselfmessverfahren eine bessere Übertragbarkeit der Messwerte auf dem gesamten Bestand als andere Messverfahren aufweist (Messung an acht Stellen des Bestandes), werden nicht alle Abweichungen der Verdunstungs- und Photosyntheseleistung im Bestand berücksichtigt. Die Berechnung der Bestandestranspiration wird aus der momentanen Transpirationsmassenstromdichte (vgl. Gl. 37) als Mittelwert der acht Küvettenmessdaten und des wöchentlich berechneten LAI ( $\text{m}^2 F_t / \text{m}^2 F_g$ ) (vgl. Gl. 9) durchgeführt. Der Wasserumsatz des Bestandes steigt jedoch bei unveränderter Grundfläche proportional zur Blattfläche. Dabei wird die zeitliche und räumliche Variabilität der Verdunstungsleistung jedes einzelnen Blattes nicht beachtet. Der LAI-Wert macht keine Aussage über die aktive Transpirationsfläche (BECK, 2000).

### ***Schlussfolgerungen:***

Das EPM-Messgerät ermöglicht, Gaswechselfmessungen in großen Pflanzenbeständen durchzuführen. Messungen werden gleichzeitig an mehreren Standorten vorgenommen. Die Auswahl geeigneter Sensoren und Materialien ermöglicht die stabile Funktion des Gerätes über längere Zeiträume. Das Messgerät arbeitet zuverlässig und mit hoher Präzision. Die Messdaten der Transpirations- und Nettophotosyntheseraten sind übertragbar auf größere Pflanzenbestände. Die Interpolation der gemessenen momentanen Transpirationsmassenstromdichte (pro  $\text{m}^2$  in den Küvetten eingeschlossene Blattfläche) auf den gesamten Bestand durch den wöchentlich gemessenen LAI-Wert, ist durch präzisere Methoden zu ersetzen.

#### **5.2.3.b Langzeitüberprüfung der Exaktheit des Messverfahrens**

Die Übertragung von Messdaten des Massentransportes einzelner Pflanzen auf gesamte Pflanzenbestände wird in der Literatur hauptsächlich durch Summierung von Lysimeterwägungen oder durch Wasserbilanzbildungen in bestimmten Zeiträumen (stündliche, tägliche oder jährliche Zeitintervalle) überprüft. In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode der Wasserbilanzbildung in Tagesintervallen ausgewählt.

Es wurde ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen den täglich zugeführten und den abgeführten Wassermengen während der gesamten Auswerteperiode bei allen Kulturen festgestellt. Bei einer Sommerkultur von *Capsicum annuum*, die mit 33,3 % weniger Wasser als es die Transpirationsumsätze erforderte versorgt wurde waren die gesamten zugeführten Wassermengen 24,3 % niedriger als die Gesamttranspiration. Die Variation der täglichen Gießmengen entsprach der Variation der täglichen Transpirationssummen (Tab. 8).

Die mit 33,3% Überschusswasser geführte Bewässerungssteuerung einer *Lycopersicon esculentum* Winterkultur ergab einen täglichen Durchschnitt des Wasserüberschusses von 26%. In der gesamten Auswerteperiode war der Überschusswasseranteil 25,3 % und daher nicht wesentlich abweichend von der Zielmenge. Die täglichen Gießmengen variierten nach den täglichen Transpirationssummen (Tab. 9).

Die Erfassungsmöglichkeit der Bestandestranspirationssummen konnte auch unter Herbstbedingungen im mediterranen Raum und für eine Perlitkultur bestätigt werden. Der aus den täglichen Wasserbilanzen berechnete Überschussanteil von *Gerbera jamensonii* Pflanzen hatte einen Durchschnitt von 58,9 %, ebenso wenig different zu den erwarteten 67%. Insgesamt wurden 58,7 % Wasser als Überschussmenge registriert (Tab. 10).

Als Quelle systematischer Fehler wirkt beim Zweikanalmesssystem EPM 2005 die Messabweichung zwischen den Küvetten- und Referenzluftsensoren. Trotz der nach Herstellerangaben geringen Drifteigenschaften insbesondere der kapazitiven Feuchtesensoren kommt es durch Abweichungen bei längeren Bewässerungszyklen zu Fehler in der Wasserbilanzbildung.

Der Fehler der täglichen Wasserbilanz lag im Durchschnitt bei  $-0,6$  l für *Lycopersicon esculentum* und bei  $0,5$  l für *Gerbera jamensonii*. Der Bilanzfehler in der Auswerteperiode war  $-3,5$  % bzw.  $4,5$  % (Tab. 9, 10). In Langzeiterfassungen der Wasserbilanz wurden aufgrund dieses systematischen Fehlers höhere Transpirationssummen aufgezeichnet. Es kam zu vorzeitigen Bewässerungen, was zu höheren Gießmengen/Tag als die täglichen Transpirationsanforderungen, führte.

Ein zufälliger Fehler bei der Wasserbilanzierung ergibt sich aus den spezifischen dynamischen Eigenschaften des Substrats bezüglich des Wasserspeicherverhaltens. Ein Teil des Substratwassers wird gespeichert und löst sich mit Zeitverzögerung in die Drainage. Diese Wassermenge war in der Bilanz des

nachfolgenden Tages deutlich zu registrieren (Abb. 36, 38). So war der negative Bilanzausgang nicht durch eine Wasserdefizitsituation zu definiert. Der Korrelationskoeffizient der Regression der gemessenen Tageswasserumsätze zu den berechneten (Bilanzgleichung) war 0,7 bei der Tomatenkultur und 0,8 bei der Gerberakultur (Abb. 37, 39). Da der beschriebene systematische Fehler in beiden Korrelationsgrößen korrigiert wurde, ist die Abweichung des Bestimmtheitsmaßes vom Wert 1 durch den zufälligen Fehler der Drainagemenge zu erklären. Dies zeigt sich gegenüber den Drainagemengen auch durch einen stabilen  $WUE_T$ -Verlauf. Das Pflanzenwachstum sollte berücksichtigt werden, da es einen Einfluss auf die Drainagemenge übt.

### **Schlussfolgerungen:**

Die Möglichkeit Transpirationssummen an *Capsicum anuum*, *Lycopersicon esculentum* und *Gerbera jamensonii* Beständen über längere Zeitperioden direkt zu messen, wurde durch einen guten Wasserbilanzausgleich über mehrere Kulturtage bestätigt. Die Messmethode ist nicht kultur- und/oder substratabhängig. Um die transpirationssummengesteuerte Bewässerung präziser führen zu können, ist eine exakte Berechnung der Transpirationssumme erforderlich. Dabei ist auch die ungleichmäßige Drainagebildung in den einzelnen Kulturtagen zu berücksichtigen. Die Einbeziehung der aktuellen Wachstumsrate des gesamten Bestandes im Steuerungsalgorithmus ist erforderlich.

## **5.3. Bewässerungssteuerung nach gemessenen Transpirationssummen**

### **5.3.1. Steuerung bei hoher Einstrahlung unter nordeuropäischen Gewächshausbedingungen**

Bei hoher Einstrahlung und niedrigen Luftfeuchtigkeitsbedingungen reagieren die Pflanzen mit Öffnung der Stomata bzw. Reduzierung des stomatären Widerstandes. Die Wasserumsätze werden dadurch stark modifiziert. Hohe  $VPD_i$ -Werte verursachen Wasserstress, welcher zur partialen oder kompletten Schließung der Stomata führen kann. Negative Konsequenzen auf den Gaswechsel (Transpiration, Photosynthese) und dementsprechend auf den Ertrag und der Qualität sind möglich



(JONES, 1992; SEGINER, 1994; KITTAS et al., 2001 in: KATSOULAS et al., 2002), wenn nicht ausreichend bewässert wird.

Die in der Sommerperiode angestrebte 25 % Überschussbewässerung von *Lycopersicon esculentum* ergab einen täglichen Drainagedurchschnitt von 32,2 %. Die in der Auswerteperiode aufgefangene Überschusswassermenge wich nicht wesentlich von der Zielmenge ab (Tab. 11). Der Bilanzfehler betrug insgesamt –6,1 %, was durch die zeitliche Verzögerung der Drainagebildung zu erklären ist. Auch hier variierte der  $WUE_T$  zwischen den einzelnen Tagen geringer als der prozentuale Anteil der Drainage (vgl. 5.2.3.b.).

Der saugspannungsgesteuerte Bestand (praxisüblich: 50 hPa) wurde häufiger als der transpirationsgesteuerte Bestand bewässert. Dabei wurden täglich weniger Wassermengen zugeführt, die aber nicht sehr abweichend zu denen des transpirationssummengesteuerten Bestandes waren (aufgrund des höheren Wassermenge/Gießtakt in der Transpirationssteuervariante). Das verursachte im transpirationssummengesteuerten Bestand eine höhere Drainage, die aber als prozentualer Anteil der täglichen Wasserversorgung einen gleichmäßigeren Austrag hatte. Im saugspannungsgesteuerten Bestand wich der prozentuale Drainageanteil stark unter den einzelnen Kulturtagen ab, was durch die zeitliche Variationen der Pflanzenwasseranforderungen ausgeprägt wird (Tab. 11, 12).

Das Wasserpotenzial des Bodens übt einen stärkeren Einfluss auf den stomatären Widerstand als das Wasserpotenzial des Blattes aus (TURNER, 1991 in: JOLLIET, 1993). Das niedrige Bodenwasserpotenzial führt zu Turgorverlusten, was die Stomataleitfähigkeit einschränkt (LÖSCH, 2001). Die kontinuierliche Überwachung der Substratsaugspannung ist für eine wasserstressfreie Bewässerungsführung notwendig. Die Saugspannung des transpirationsgesteuerten Bestandes verlief durchschnittlich in feuchten Bereichen (Abb. 43) und war vergleichbar zu dem Saugspannungsverlauf der Saugspannungssteuervariante (Abb. 44). Die vom Tensiometer „1“ registrierte Saugspannung verlief entsprechend den anderen zwei Messorten, höher (Abb. 42). Die Repräsentativität der Messwerte wird dadurch zweifelhaft (LAI-Wert nicht ausreichend, vgl. 5.2.3.a.).

Ein ausreichender Verlauf der Substratsaugspannung in erwünschten Grenzbereichen ist kein Garant für wasserstressfreie Bedingungen. Besonders unter hoher Einstrahlung in Verbindung mit hohen Lufttemperaturen und niedriger Luftfeuchtigkeit ist die Gefahr eines Stresseintrittes sehr hoch, welcher eine negative

Auswirkung auf physiologische Abläufe, wie die Photosynthese und das Wachstum, hat (LAWLOR et al., 1993 in: HEISSNER, 1998). Nach Angaben von EAMUS (1991) gibt die langzeitige und großräumige WUE-Messung der Agronomen als Massenverhältnis zwischen Trockenmasse und Verdunstungsmenge ein besseres Bild des Pflanzenwachstums und der Wassernutzung einer Pflanze, als die momentane Transpirationseffizienz (ITE oder  $WUE_p$ ). Der  $WUE_p$  der Produktivität war in der gesamten Kulturperiode im Durchschnitt 2,33 TS/kg H<sub>2</sub>O. Der Verlauf des  $WUE_p$  war typisch für dikotyle Pflanzen (LARCHER, 2001). Durch die Fruchtbildung der Sorte „Rondello“ wurde der  $WUE_p$  ab der 6. Kulturwoche eingeschränkt, was auch ab der 9. Kulturwoche durch die Fruchtbildung der Sorte „Bolero“ zu beobachten war.

Die Steuerungsmethode ist einsetzbar unabhängig von der Sorte (vgl. 4.8.2.a.). Der gesamte Ertrag des transpirationsgesteuerten Bestands unterschied sich nicht signifikant zu dem des saugspannungsgesteuerten Referenzbestandes. Keine signifikanten Unterschiede wurden auch in der Fruchtanzahl, der Blattanzahl sowie der Pflanzengröße festgestellt. Das Wasser wurde im saugspannungsgesteuerten Bestand effizienter eingesetzt, was jedoch versuchsbedingt durch den angestrebten Wasserüberschuss im transpirationsgesteuerten Bestand zu erklären ist. Signifikant geringer waren die nicht marktfähigen Erträge der Sorte „Rondello“ in beiden Steuerungsvarianten. Auch die Fruchtanzahl pro Pflanze war sortenspezifisch. Die Sorte „Bolero“ gab mehrere, aber leichtere Früchte als die Sorte „Rondello“, ab (Tab. 19).

### **Schlussfolgerungen:**

Die nach gemessenen Transpirationssummen gesteuerte Bewässerung von *Lycopersicon esculentum* mit einer gezielten Überschusswassermenge von 25 % wurde erreicht. Die Methode ist vergleichbar mit einer weiteren praxisüblichen Steuerungsmethode (Saugspannung: 50 hPa). Höhere Wassermengen/Gießtakt und längere Bewässerungszyklen führen zu einer gleichmäßigeren Drainageverteilung über mehrere Kulturtage. Es sind keine Ertrags- und Qualitätseinbussen zu erwarten. Die Methode ist von der Tomatensorte unabhängig.

Unter Berücksichtigung des Saugspannungsverlaufes in niedrigen Bereichen, ergibt sich die Möglichkeit, die Schaltschwelle oder die Gießmenge je Takt im Steuerungsalgorithmus zu erhöhen bzw. zu vermindern, um die eingesetzten Was-

sermengen zu reduzieren. Somit könnte ein effizienterer Einsatz des Wassers erreicht werden.

### **5.3.2. Steuerung bei hoher Einstrahlung unter südeuropäischen Gewächshausbedingungen**

Durch eine kontinuierlich ausreichende Bewässerung der Pflanzen, gesteuert nach den gemessenen Transpirationssummen, konnte langfristig eine gute Wasserbilanz erreicht werden (vgl. 5.2.3.b.). Die für die Sommerperiode im mediterranen Gebiet typischen plötzlichen Veränderungen der klimatischen Faktoren haben unmittelbare Auswirkungen auf den Wasserumsatz eines Bestandes. Auch die kurzfristigen Änderungen des Substratwassergehalts in Materialien, die ein hohes Pufferungs-vermögen haben, sind unter solchen Klimabedingungen zu berücksichtigen, um Stresssituationen zu vermeiden.

Unter extremen Sommerbedingungen waren die täglichen Wasserbilanzen ausgeglichen (Abb. 45). Die 30 % angestrebte Überschussbewässerung ergab einen annähernden täglichen Drainagedurchschnitt von 34,6 %. In der gesamten Auswerteperiode war der Überschussanteil der Bilanz 36,2 % (Tab. 13). Der  $WUE_T$  variierte auch hier geringer als der prozentuale Anteil der Drainage während der Kulturtage (vgl. 5.2.3.b.).

Im Vergleich zum zeitgesteuerten Bestand wurden beim transpirations-gesteuerten Bestand mehr Bewässerungszyklen gestartet. Im täglichen Durchschnitt wurde die Transpirationsvariante mehr bewässert. Höhere Drainagemengen bildeten sich im zeitgesteuerten Bestand (Tab. 13, 14). Durch die häufige und nach den Pflanzenanforderungen angepasste Bewässerung, wird die hohe Porosität und Speicherkapazität des Perlit effizienter eingesetzt, sodass keine großen Wassermengen durch das Substrat durchsickern.

Der durchschnittliche  $WUE_P$  der Produktivität war in den ersten Kulturwochen 15,5 TS/kg  $H_2O$ , was auf eine hohe Trockenmasseproduktion deutet. In der Blütenphase (35. bis 38. Kulturwoche) war der  $WUE_P$  eindeutig niedriger (im Durchschnitt 3,2 TS/kg  $H_2O$ ). Der Verlauf des  $WUE_P$  war typisch für dikotyle Pflanze (LARCHER, 2001).

Die Steuerungsmethode ist einsetzbar unabhängig von der Sorte (vgl. 4.8.2.a.). Der gesamte Ertrag des transpirationsgesteuerten Bestandes war signifikant höher, als der des zeitgesteuerten Bestandes (Tab. 20). Die Unterschiede der Stielhöhe

waren sortenspezifisch. Signifikant höher war der Ertrag beider Sorten, die nach den Transpirationssummen gesteuert wurden. Dabei war der Anteil der nicht marktfähigen Blüten in der zeitgesteuerten Bewässerung signifikant höher.

### **Schlussfolgerungen:**

Die nach gemessenen Transpirationssummen gesteuerte Bewässerung von *Gerbera jamensonii* mit einer gezielten Überschusswassermenge von 30 % konnte trotz der hohen Einstrahlung und geringen Luftfeuchtigkeitsbedingungen erreicht werden. Die transpirationssummengesteuerte Bewässerung von Gerberapflanzen in Perlit ergab einen höheren Ertrag, mit einem höheren marktfähigen Anteil, als eine zeitgesteuerte Bewässerung. Die hohe Porosität und Speicherkapazität des Perlit wird besser eingesetzt. Die Methode ist von der Gerberasorte unabhängig.

### **5.3.3. Bedarfsgerechte Bewässerung ohne Salzakkumulationen im Substrat**

Eine präzise Wasserführung an einem *Lycopersicon esculentum* und einem *Cucumis sativus* Bestand konnte erreicht werden. Minimale Drainagemengen der Höhe von 4,4% bzw. 3,6% wurden aufgenommen. Diese waren nicht signifikant verschieden von den saugspannungsgesteuerten Beständen (3% bei *Lycopersicon esculentum*, 11% bei *Cucumis sativus*). Signifikant höhere Drainagemengen wurden bei niedriger Schaltschwelle als die 60 hPa (30 hPa, 40 hPa) festgestellt (18% bei *Lycopersicon esculentum*, 51% bei *Cucumis sativus*) (Tab. 15, 16).

Im erdlosen Kulturanbau ist durch das kleine Substratvolumen an der Wurzelzone die Erhaltung einer ausreichenden Nährstoffbilanz ohne Salzakkumulation komplizierter als im Bodenanbau. Eine nicht akkurate Düngeführung wirkt sich schnell auf den Pflanzenbestand aus. Salzakkumulationen im Wurzelbereich beeinflussen nach kurzer Zeit die physischen und chemischen Bodeneigenschaften (BHUMBLA, 1997) wie auch den Pflanzenertrag (SOMANI, 1991 in: KAPLAN et al., 1999).

Im *Lycopersicon esculentum* Bestand ergab die transpirationsgesteuerte Bewässerung mit minimalen Überschussmengen einen ähnlichen Stickstoffverlauf im Substrat und in der Drainage wie bei der 60 hPa Variante und der 30 hPa Variante. Im Substrat aller Steuerungsvarianten war in den ersten Kulturwochen der Stickstoffgehalt hoch (Abb. 50), was durch die frühe Entwicklungsphase der Pflanzen zu erklären ist. Bei den Jungpflanzen war die Wasseraufnahme stärker als

die Nährstoffaufnahme. In den folgenden Kulturtagen sank der Stickstoffgehalt der Substrate, wobei jener in den Drainagen sich in einem leicht höheren Bereich stabilisierte, was auf eine hohe Nährstoffaufnahme hinweist. Die Tomatenbestände der drei Steuerungsvarianten nahmen in den letzten Kulturtagen keinen Stickstoff mehr auf, sodass in den Substraten und in den Drainagen höhere Stickstoffmengen zu finden waren als davor. Durch die häufige Bewässerung der 40 hPa Variante und die dadurch entstandenen hohen Drainagemengen erfolgte eine Stickstoffauswaschung eher als bei den weiteren zwei Varianten (Abb. 50, 52).

Nach Angaben von NORRIE et al. (1995) ist bei einem saugspannungsgesteuerten Tomatenbestand (50 hPa) mit einer Nährlösungskonzentration von 2,5 dS/m die durchschnittliche EC bei Peat-Substraten 4,79 dS/m und bei Steinwolle 3,79 dS/m (in: DORAIS et al., 2001). In einer Tomatenkultur in Steinwolle variierte die EC des Substrates zwischen 2,8 und 3,4 dS/m, was mit den praxisüblichen Werten übereinstimmte. Da die EC eine schnelle Auswirkung auf das Frischgewicht des Produktes hat, ist daher eine stabile EC im Substrat erforderlich (STRADIOT, 2001). Die hier registrierten EC-Werte der Substrate waren in den vorgenannten Grenzen, mit einem relativ stabilen Verlauf über die gesamte Kulturperiode. Eine leichte Erhöhung erfolgte zum Schluss der Kulturperiode, was durch die niedrige Nährstoffaufnahme der voll entwickelten Pflanzen zu erklären ist (Abb. 54 a). Die in den einzelnen Kulturtagen unterschiedlichen Drainagemengen verursachen variierende Nährstoffkonzentrationen im Überschusswasser (VAN NOORDWIJK, 1990), was die tägliche Variation der EC in den Drainagen erklärt (Tab. 17). Eine EC in den Drainagemengen zwischen 2,7 und 4,7 dS/m ist nicht limitierend für das Wachstum und den Ertrag (in: KLÄRING et al., 1999). Der pH der Nährlösung sowie der Drainagen war über die gesamte Kulturperiode relativ stabil (Abb. 54 b, Tab. 17).

Auch im *Cucumis sativus* Bestand ergab sich in allen Steuerungsvarianten ein ähnlicher Stickstoffverlauf im Substrat und im Drainagewasser (Abb. 51, 53). Die Klimaführung mit höheren Temperaturen als im Tomatenbestand (20°C/25°C gegenüber 15°C/25°C) könnte zu einer starken Mineralisierung im Gurkensubstrat geführt haben, was die hohen NO<sub>3</sub>-Gehalte und somit den hohen N<sub>min</sub>-Gehalt verursachte. Dadurch ergaben sich auch höhere EC-Werte im Überschusswasser der Gurkenbestände (bis auf 5,9 dS/m, Tab. 18). Da dieser Stickstoffüberschuss im Substrat und im Überschusswasser über mehrere Kulturwochen entstand, waren

auch niedrigere Variationen des EC-Wertes als im Tomatenversuch zu beobachten (Tab. 18).

In beiden Kulturbeständen und für alle Steuerungsvarianten hatten die Früchte einen signifikant ähnlichen Stickstoffgehalt ( $N_t$ ) (Abb. 56 a, b). Es wurden keine Ertragsverluste festgestellt. Im *Lycopersicon esculentum* Bestand war das Ertrag/Wasser-Verhältnis (WUE) im saugspannungsgesteuerten Bestand (60 hPa) besser als im transpirationssummengesteuerten Bestand, ohne dass sich die entsprechenden Erträge signifikant unterschieden. Auch bei höheren Bewässerungsmengen (40 hPa Variante) war der Ertrag nicht signifikant unterschiedlich, wobei das Wasser ineffizienter eingesetzt wurde. Die Fruchtanzahl/Pflanze, wie auch das durchschnittliche Gewicht der Früchte, waren gleich in allen drei Steuerungsvarianten (Abb. 58). Im *Cucumis sativus* Bestand hat die bedarfsorientierte Bewässerung leichtere aber dafür eine höhere Anzahl von Früchten ergeben, was sich jedoch nicht signifikant zu den anderen zwei Steuerungsmethoden unterschied. Die Pflanzen der Bestände der drei Steuerungsvarianten waren gleich groß, mit signifikant gleicher Blattanzahl/Pflanze und Fruchtanzahl/Pflanze (Tab. 21). In dem saugspannungsgesteuerten Bestand bei 30 hPa wurde das Wasser ineffizienter eingesetzt.

### **Schlussfolgerungen:**

Die Bewässerung von *Lycopersicon esculentum* und *Cucumis sativus* Pflanzen wurden nach den gemessenen Transpirationssummen exakt gesteuert, ohne eine Salzanreicherung im Substrat zu verursachen. Im Vergleich zu einem praxisüblich saugspannungsgesteuerten Bestand (Saugspannungsschaltsschwelle 60 hPa), wie auch zu einem mehr bewässerten Bestand (30 bzw. 40 hPa), wurden keine Ertrags- oder Qualitätseinbußen festgestellt. Die Bewässerungssteuerung bei 30 bzw. 40 hPa ergab höhere Überschussmengen, was zu einem ineffizienten Wassereinsatz führte.

#### 5.4. Optimierungsansätze einer bedarfsgerechten Bewässerungssteuerung

Die exakte Bewässerung der Pflanzen ist einerseits abhängig vom richtigen Bewässerungszeitpunkt und andererseits von der entsprechenden Bewässerungsmenge. In der Bewässerungssteuerung nach online Messung der Transpiration wird die Häufigkeit der Bewässerung automatisch den pflanzlichen Anforderungen angepasst. Durch Veränderung der Schaltschwelle im Steuerungsalgorithmus können die Bewässerungszyklen den jeweiligen Wasseranforderungen angepasst werden. In der bedarfsgerechten Bewässerung mit minimalen Drainagemengen wurden starke Saugspannungsanstiege beobachtet. Bei einer unveränderten Bewässerungsschaltschwelle bei *Lycopersicon esculentum* wie auch *Cucumis sativus* wurde ein Anstieg der Substratsaugspannung registriert. Um die Saugspannung zu reduzieren, wurde die Schaltschwelle abgesenkt. Somit wurden kürzere Bewässerungszyklen erreicht. Aufgrund der Pflanzenentwicklung wurde nach einigen Tagen ein weiterer Anstieg der Saugspannung beobachtet (Abb. 48, 49). Obwohl langfristig keine Ertrags- oder Wachstumseinschränkungen festzustellen waren (vgl. 5.3.3), ergaben die Kurzzeitanalysen einen variierenden Saugspannungsverlauf über die Kulturzeit, der sehr hohe Werte erreichte.

Tensiometer werden in einer zeit- und globalstrahlungsgesteuerten Bewässerung, zur Korrektur der Wassermengen in der Nachtperiode (PASCHOLD et al., 1995), wie auch zur Unterstützung einer mittels LVDT-Sensors geregelten Bewässerung (COHEN et al., 1998), eingesetzt. Zur Verbesserung der Genauigkeit der EPM-geführten Bewässerung kann eine Tensiometerüberwachung der Substratsaugspannung dazu dienen über Trendabweichungen die Bestandsparameter insbesondere die LAI-Werte zu adaptieren. Wenn die Transpirationssumme die vorgegebene Schaltschwelle nicht erreicht hat und die Substratsaugspannung eine maximale Grenze überschritten hat, kann zur Sicherheit der Bewässerungstakt vom Tensiometer ausgelöst werden (Abb. 59).

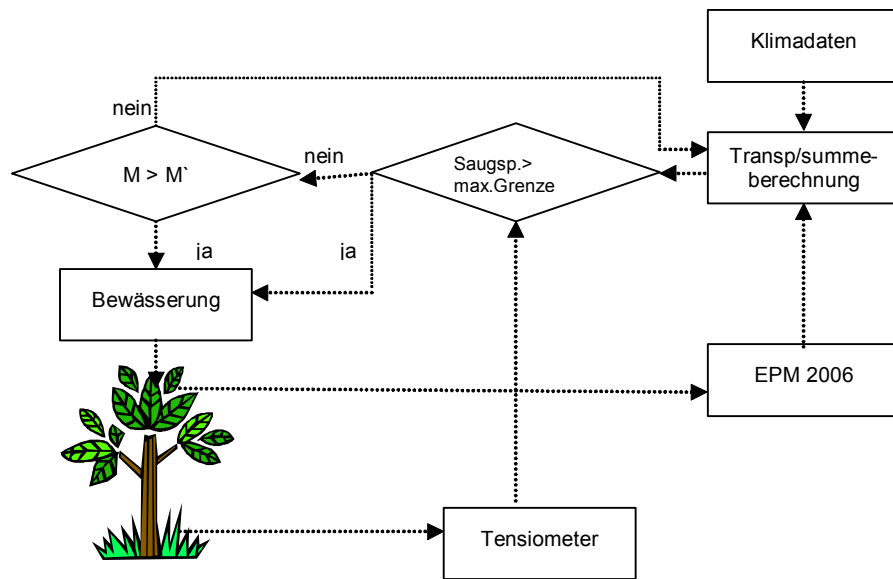


Abb. 59: Flussdiagramm einer Bewässerungssteuerung anhand von online gemessenen Transpirationsmengen mit integrierter Saugspannungsüberwachung (Tensiometer)

Um den Unsicherheiten der punktuellen Messung der Tensiometrie (vgl. 5.2.1.) zu entweichen, ist der Trend der Saugspannung über eine bestimmte Zeit (12 Std. oder 24 Std.) im Steueralgorithmus zu integrieren. Der Saugspannungstrend wird als Rückkopplung des transpirationsbasierenden Steueralgorithmus benutzt (LIEBIG et al., 1999; VOOGT et al., 2000). Aus den Versuchen der bedarfsgerechten Bewässerungssteuerung von *Lycopersicon esculentum* und *Cucumis sativus* Pflanzen (vgl. 4.6.3. bzw. 4.6.4.) ist festzustellen, dass sich der Saugspannungstrend entsprechend der Schaltschwellenveränderungen anpassen kann. Wird die Schaltschwelle der Bewässerung abgesenkt, bewegt sich der Trend näher dem Nullpunkt (Abb. 48, 49).

Eine Anpassung des Transpirationsalgorithmus zur aktuellen Wachstumsrate des zu bewässernden Bestandes ist erforderlich. Über längere Zeitabschnitte kann durch Wachstumsprozesse die Übertragbarkeit von punktuell erfassten pflanzlichen Daten negativ beeinflusst werden (vgl. 5.2.3.a, 5.2.3.b.). Zur Berechnung der Wasseranforderungen einer Kultur, insbesondere bei Freilandkulturen, werden häufig Koeffizienten eingesetzt. Sie werden nach der Entwicklungsphase berechnet und sind kulturspezifisch. Die Ermittlung solcher Koeffizienten erfolgt nach Versuchsdurchführungen unter mehreren Umweltbedingungen und ist somit zeitintensiv. Das „Big Leaf“-Modell ist ein einfacher, meist praktikabler Ansatz, um repräsentative Leitfähigkeitswerte, die aus dem Integrationsniveau des Einzelblattes erhalten



wurden, mit dem für den Bestand typischen Blattflächenindex zu multiplizieren (LÖSCH, 2001). Eine laufende Anpassung der Modelle an das jeweilige Wachstumsstadium wird durch die Einbeziehung der Blattflächenentwicklung (LAI-Wert) ermöglicht. Die Messung der Blattfläche wird manuell oder unter Benutzung von Scannern durchgeführt: beides aufwendige Methoden.

In den letzten Jahren sind Informationen des Kulturwachstums in Bezug auf die Veränderungen der Umweltkonditionen für die Agrarforschung von großer Bedeutung. Solche Modelle werden im Modellierungsprozess der Klima- und Bewässerungssteuerung im Gewächshaus integriert (NEDERHOFF et al., 1989; GOUDRIAAN et al., 1994; CHALLA, 2001; HEISSNER et al., 1994). Mechanistische Modelle, wie das TOMGRO- (JONES et al. 1991) und das TOMSIM-Modell (HEUVELINK, 1996) stellen eine dynamische Vorhersage des Wachstums und Ertrags einer Tomatenkultur dar. Strukturmodelle sind zur Visualisierung der Pflanzen oder zur Bewertung der Wechselwirkungen zwischen morphologischen und physiologischen Pflanzen- oder Bestandescharakteristika und deren physikalischen oder biologischen Umgebung geeignet (STÜTZEL et al., 2004). Wachstumsmodelle können dadurch die Bewässerungssteuerung auf Echtzeitbasis kontrollieren (Abb. 61).

Nicht immer und nicht alle klimatischen Faktoren sind zeitkritisch, so dass ihre Summenwerte bzw. Mittelwerte eine bessere Aussagekraft als ihre momentane Werte haben (TON et al., 2001). Nach Angaben von BECK (2000) sollte es möglich sein, durch eine entsprechende Verknüpfung der einzelnen Führungsgrößen, sowohl eine Einzelgrößenregelung als auch eine Mehrgrößenregelung einzustellen. Die zwischen zwei fortlaufenden Gießtakten auftretenden Summen der Einstrahlung, des  $VPD_i$  und der  $VPD_{i-b}$  wurden für den transpirationssummen-gesteuerten *Lycopersicon esculentum* Bestand (vgl. 4.5.2.) berechnet. Die Summen des  $VPD_i$  variierten im Tag weniger als die der  $VPD_{i-b}$ . Dabei waren im Tagesverlauf die Einstrahlungssummen zwischen den Gießtakten sehr abweichend voneinander (Abb. 60 a, b, c).

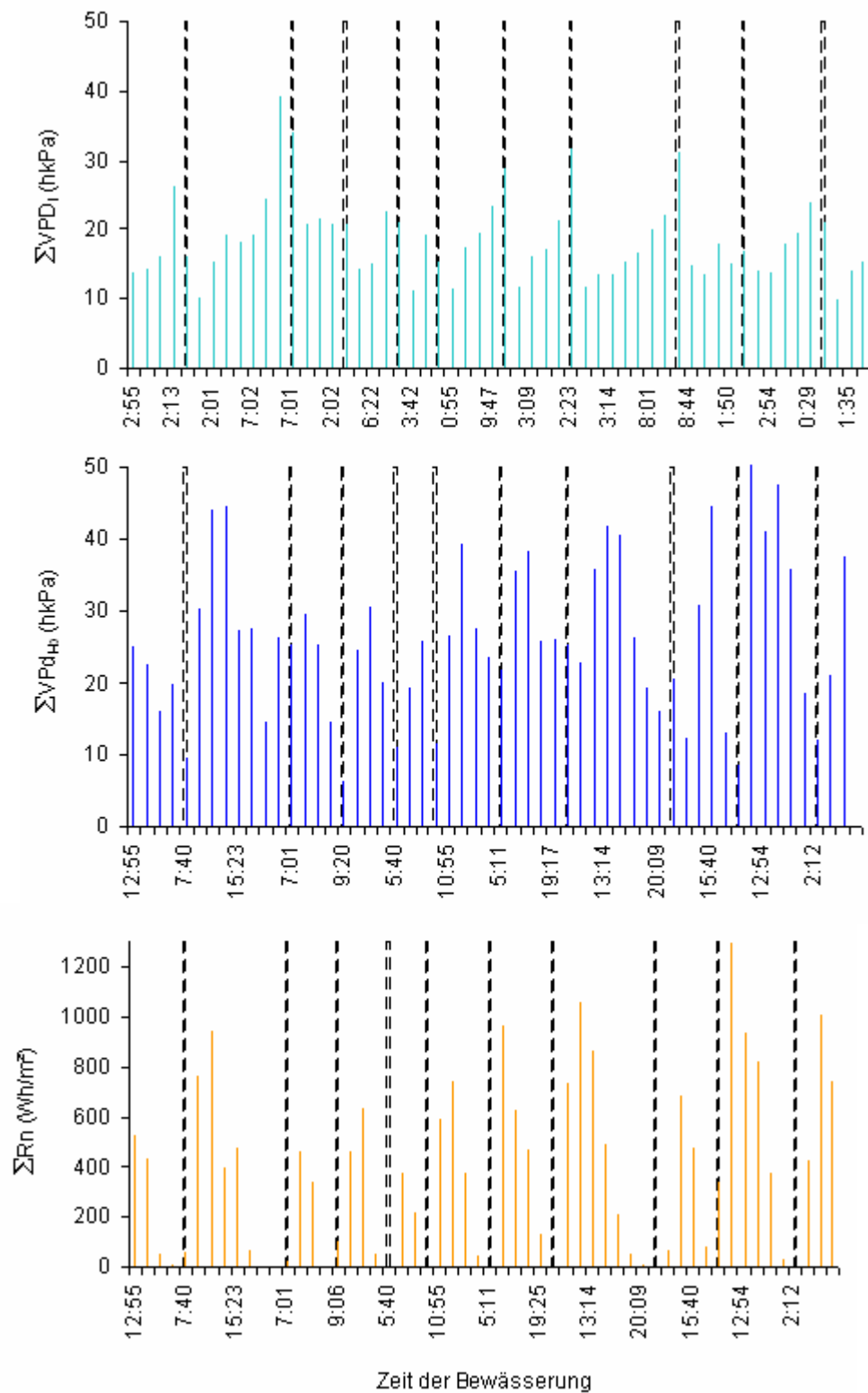


Abb. 60: Berechnete Summen a) des  $VPD_i$  b) der  $VPD_{ib}$  und c) der  $Rn$  zwischen zwei fortlaufenden Gießtakten eines transpirationssummengesteuerten *Lycopersicon esculentum* Bestandes

Die Ermittlung der pflanzlichen Wasserumsätze kann somit mit einem Klimamodell erfolgen. Als Informationsquelle dient ein Klimamodell, das seine Funktion an einfach gemessenen klimatischen Parametern wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung orientiert. Zur Überwachung der modellgeführten Bewässerungssteuerung können auch in diesem Fall Tensiometer eingesetzt werden (Abb. 61).

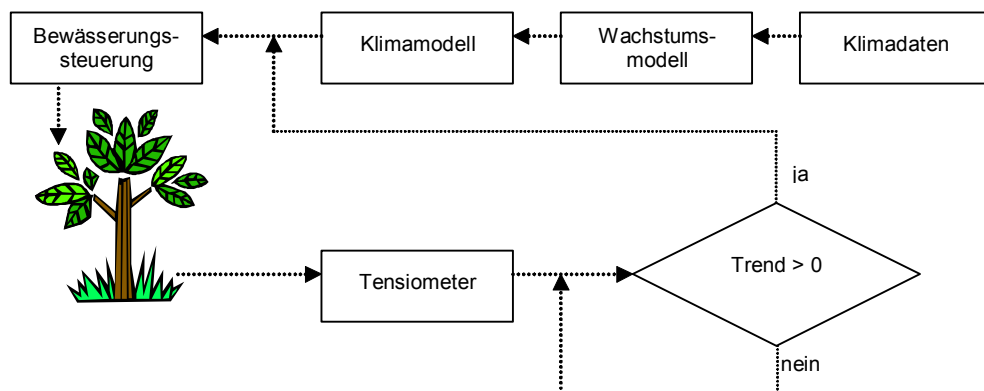


Abb. 61: Modellgesteuerte Bewässerung mit sensorischer Überwachung

Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Grenzen der klimatischen Summenwerte an unterschiedlichen Pflanzenarten und unter verschiedenen Klima-bedingungen sind erforderlich. Die Analyse von kumulierten Einflussgrößen zwischen den Bewässerungstakten bei gleichzeitiger Steuerung nach gemessenen Transpirationssummen kann dazu dienen die Regelqualität der Bewässerung weiter zu verbessern. Da die Dampfdruckdifferenz bzw. die Wasserdampfkonzentrationendifferenz die treibende Kraft für die Transpiration darstellt, ist sie bei der Erstellung dieses Modells vorzuziehen. Nachteilig ist dabei die Notwendigkeit der Messung der Blattemperatur. Ein Phytomonitoring-System zur direkten Erfassung der pflanzlichen Reaktionen kann, neben der Trendanalyse als Rückkopplungs-strategie zur Überwachung der modellgesteuerten Bewässerung dienen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der moderne Gewächshausanbau ist weltweit gekennzeichnet durch hoch entwickelte Technologien, die den ökonomischen und ökologischen Produktionsansprüchen dienen. Der verstärkte Wassermangel und die ökologische Belastung durch Düngemittel und Pestizide erfordert eine kontrollierte und präzise Applikation von Wasser und Nährlösung. Innovative Bewässerungssysteme und –verfahren, wie auch hydroponische Kulturtechnologien mit offener und geschlossener Führung, dienen dazu. Der effiziente Einsatz von Wasser und Nährstoffen ist von großer Bedeutung für eine ökonomische Erhaltung hoher und qualitativer Produktmenge und für die Sicherung der Prozessqualität.

Im Rahmen optimaler Bewässerungssteuerung des integrierten Anbaus ist die Bestimmung der Wasserumsätze von Pflanzenbeständen von zentraler Bedeutung. Dabei wird die Pflanze als Teilkomponente des SPAC-Systems betrachtet, welche im Wassertransportweg zwischen Boden und Atmosphäre steht. Die messtechnische Ermittlung des Wasserhaushalts im SPAC-System erfolgt durch Messungen an den einzelnen Komponenten Boden, Pflanze und Atmosphäre. Eine stärkere Aussagekraft über den tatsächlichen Wasserstatus der Pflanze bietet die sensorische Informationsgewinnung an der Pflanze selbst (Phytomonitoring). Die Übertragbarkeit der gewonnenen Daten auf große Pflanzenbestände und die hohe Genauigkeit und Dynamik des Sensors sind Voraussetzungen zur Präzision der darauf anschließenden Steuerungsmethode.

Ein neuentwickelter Phytomonitor (EPM 2005 bzw. 2006), der auf dem Prinzip einer Gaswechsellmessung an einzelnen Pflanzenblättern basiert, wurde zur Messung der momentanen Transpirationsintensität von Pflanzenbeständen eingesetzt. Ein Steuerungsalgorithmus, basierend auf die gebildeten Transpirationssummen, wurde für die Bewässerungsführung erstellt und überprüft. Die Untersuchungen wurden an verschiedenen Gemüsearten (*Lycopersicon esculentum*, *Capsicum annuum*, *Cucumis sativus*), wie auch an einer Zierpflanzenkultur (*Gerbera jamesonii*), durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Substrate verwendet (Einheitserde, Perlit). Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Steuerungsmethode an unterschiedlichen Anbauverfahren, wurden das Dünnschicht- und das Containerverfahren auf Kulturtischen ausgewählt. Die Präzision und Repräsentativität der Methode wurde in unterschiedlichen Jahreszeiten unter mitteleuropäischen

(Berlin, Deutschland) und südeuropäischen Gewächshausbedingungen (Thessaloniki, Griechenland) getestet. Als Vergleichsbewässerungsverfahren wurden die Saugspannungsregelungsmethode und die Bewässerung nach Zeitsteuerung herangezogen. Gleichzeitig wurden Tensiometer zur Überwachung des Saugspannungsverlaufs im Substrat eingesetzt. An *Lycopersicon esculentum* Pflanzen wurden auch Messungen zur Saftstromgeschwindigkeit durchgeführt.

Die Messung der Substratsaugspannung durch Tensiometer ist eine schnelle und für den Anbauer vertraute Methode. Eine tensiometergeregelter Bewässerung erfüllt jedoch nicht den tatsächlichen Wasserbedarf der Pflanzen. Die Sensoren sind einerseits mit bauartbedingten Schwächen verbunden und geben andererseits keine repräsentativen Messwerte für den gesamten Bestand.

Die Saftstromsensoren des LPS-03 Phytomonitor (Fa. PHYTECH) ermöglichen eine relative Messung des Stängelflusses nach der Wärmebilanzmethode. Sie sind einfach zu installieren, haben eine einfache Handhabung und eine hohe Dynamik. Die Sensoren ermitteln den relativen Trend des Saftstroms, was die Übertragbarkeit der Messdaten auf große Bestände ermöglicht. Dabei sind solche Sensoren empfindlich und werden durch die klimatischen Bedingungen beeinflusst. Die Methode zeigte keine kontinuierliche Übereinstimmung zu der Gaswechsellmethode.

Das EPM-Messgerät misst mit einer hohen Dynamik von 1 s. Durch die Verwendung von 8 Blattröhrchen wird an mehreren Stellen des Pflanzenbestands gemessen. Im Vergleich zu weiteren Phytomonitoringsystemen ist dadurch eine bessere Übertragbarkeit der Messdaten auf größeren Pflanzenbeständen gegeben. Die Methode ist dabei nicht sortenspezifisch. Bei der Überprüfung der Messgenauigkeit des Gerätes wurde durch Verdunstungstests ein Messfehler von 5,8% festgestellt. Durch ein hohes Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion der gemessenen Transpirationsmassenstromdichte bzw. Nettophotosyntheseleistung an zwei Standorten der gleichen Konditionen wurde die Homogenität des pflanzlichen Stoffaustausches in Gewächshausbeständen bewiesen. Die Übertragbarkeit der Messdaten auf den gesamten Pflanzenbestand sollte durch Wachstums- und Entwicklungsmodellen unterstützt werden.

Die Übertragbarkeit der Messdaten auf den gesamten Bestand wurde durch die Bildung der Wasserbilanz über längere Zeitperioden geprüft. Hohe Korrelationen wurden zwischen den gemessenen und den berechneten Transpirationssummen

erzielt. Der Bilanzfehler wurde durch die zeitliche Verzögerung der Drainageabgabe und durch die Fehlerfortpflanzung verursacht.

Die Bewässerungssteuerung nach den gemessenen Transpirationssummen hat die vorbestimmte Überschussmenge, sogar unter hohen Strahlungs- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen, erzielen können. Für praxisüblich eingestellten Drainagemengen (20-30%) war der  $WUE_T$  zwischen 0,7 und 0,8.

Der durch Tensiometer registrierte Saugspannungsverlauf eines transpirationsgesteuerten Tomatenbestands (Schaltschwelle: 3 l, Gießmenge: 4 l) war vergleichbar zu dem eines tensiometergeregelter Bestandes (Schaltschwelle: 50 hPa, Gießmenge: 3 l). Die zwei Bewässerungsmethoden ergaben keine signifikante Unterschiede in der Fruchtanzahl, Blattanzahl oder Pflanzengröße. Das Wasser wurde leicht effizienter in dem tensiometergeregelter Bestand eingesetzt, ohne dass sich die Erträge signifikant unterschieden.

Aus dem Vergleich der Steuerungsmethode (Schaltschwelle: 700 ml, Gießmenge: 900 ml) zu einer zeitgesteuerten Bewässerung (acht Bewässerungszeiten, Gießmenge: 1200 ml) bei *Gerbera jamensonii* Pflanzen konnte ein signifikant höherer und qualitativer Ertrag in der ersten Methode nachgewiesen werden. Dabei wurde in der ersten Methode das Wasser effizienter eingesetzt.

Minimalste Drainagemengen (<5%) im Sinne einer bedarfsgerechten Bewässerung konnten durch eine transpirationssummengesteuerte Bewässerung erreicht werden. Es wurden keine Salzakkumulationen im Substrat festgestellt. Der Ertrag und das Pflanzenwachstum wurden nicht beeinflusst.

Die Methode der Transpirationssummensteuerung kann durch Tensiometer überwacht und kontrolliert werden. Dabei kann die Trendanalyse der Saugspannung sehr hilfreich sein. Die Integration von Wachstums- und Entwicklungsmodellen im Steuerungsalgorithmus ist für eine präzisere Wasserführung erforderlich.

Die Eignung der zwischen den Gießtakten einer transpirationssummengesteuerten Bewässerung entstehenden Summenwerte der klimatischen Parameter sind für eine modellgeführte Bewässerung zu untersuchen. Der Phytomonitor EPM-2006 kann zur Überwachung einer nach Klimamodellen gesteuerten Bewässerung eingesetzt werden.

## SUMMARY

The modern greenhouse production is worldwide marked by high development technology for economical and ecological Produktionclaims services. The increased shortage of water, were as the ecological pollution through fertilisers and pesticides, requires a controlled and precise amount of water inset. Innovative irrigation systems and processes were as open and closed hydroponics systems, are used for that purpose. The efficient water and nutrients is highly significant for the economical maintenance of height amounts and for better production quality.

Within the framework of optimal irrigation systems into integrated cultivation is the determination of the water consumption of a whole canopy very important. The plant is observed as a component of the SPAC-System, which occurs the water transport-route between substrate and atmosphere. The determination of the water balance in the SPAC-System by technological measurements is reached by measuring on the individual components substrate, plant and atmosphere. The direct measuring on the plant by the Phytomonitoring-Technology is meaningful for the determination of the factual water status of the plant. The application of such measuring data on large plant canopies, such as the accuracy and the dynamic of those sensors, are prerequisites for a precise irrigation control.

A new developed Phytomonitoring (EPM 2005 or 2006), which is based on gas exchange measurements of individual plant leaves by cuvettes, was used for measuring the momentary transpirations intensity of plant cultures. A controlalgorithm, which lanes on the constituted transpirations sums, was developed and examined for irrigating scheduling. Studies were carried out on variable vegetables (*Lycopersicon esculentum*, *Capsicum anuum*, and *Cucumis sativus*) as well as on a floriculture species (*Gerbera jamensonii*). Different substrates were used (institutional soil for vegetable cultures and perlite for gerbera culture). The applicability of this irrigation scheduling method in variable culture methods was tested on thin-layer and container culture. The precision and representatively of the method was tested on different seasons under central European (Berlin, Germany) and south European (Thessaloniki, Greece) greenhouse conditions. The tensiometer control method as well as a time-scheduled irrigation system were used for comparison purposes. Tensiometers were used for monitoring the suction course

in the substrate. Sap flow measurements were made on a *Lycopersicon esculentum* culture.

Although the tensiometer measurements of the suction course a quick method and familiar to the grower is, is such irrigation scheduling method not corresponding to the actual water demands of the plants. On the one hand, the sensors are bound to constructive conditions deficiencies and on the other hand, they do not give representative measuring for the entire canopy.

The SF-sensors of the LPS-03 Phytomonitoring (PHYTECH Company) give relative measurements of the sap flow, on the basis of the thermal balance method. They are simple to install and to handle and they are highly dynamic. The sensors determine the relative trend of the sap flow, which enables the transmissibility of the measurements on large canopies, though they are sensitive and can be influenced by the climatic conditions. In our experiments no steady agreement could be proved between the sap flow measurements and the transpiration measurements gain through the gas exchange method.

The EPM-Phytomonitoring is measuring with a dynamic of 1 s. Measurements are carried out in eight sites (leaves) of the canopy. In comparison to other Phytomonitoringsystems gives this one a better transmissibility of the measurement on big canopies. Evaporation tests were carried out to improve the measurements precision of the sensor. The measurement error is about 5,8 %. A high coefficient of determination of the regression line between the measured transpirations intensity (and photosynthesis intensity) of two sites with the same conditions, was found. This improves the homogeneity of the mass exchange in greenhouse canopies. The measurements transmissivity on the whole canopy should be supported by crop growth and development models. The method is not cultivar specific.

Water balances were builded over long periods to prove the transmissivity of the measurements over the whole canopy. The measured transpiration sums were high correlated to the calculated ones (through the water balance equation). The time delays of the drainage procedure and the error propagation have caused a balance error.

The drain target of 20-30% (usual for the practical experience) of the irrigation scheduling method, based on the measured transpiration sum, could be reached even under high radiation and low humidity conditions. The  $WUE_T$ , as the ratio of the



transpired water amounts to the supplied water amounts through the cultivation period, was 0,7 to 0,8.

The substrate of a tomato stand irrigated after the transpiration sum method (switch threshold: 3 l transpiration sum, irrigation amount: 4 l) showed a suction-course comparable to the one of a tensiometer-controlled stand (switch threshold: 50 hPa, irrigation amount: 3 l). There were no significant differences in the fruit number, leaf number or plant height between the two canopies. The water was efficiently consumed in the tensiometer-controlled stand, were as the yields were significantly not different.

The comparison of a *Gerbera jamesonii* stand, irrigated after the measured transpiration sums (switch threshold: 700 ml, irrigation amount: 900 ml) to the one, irrigated after a time irrigation-system (eight times daily, irrigation amount: 1200 ml) gave significant differences in the amount and quality of the flowers. The transpiration sum method gave more and better flowers, were as the water amounts were efficiently consumed.

Minimal drain water amounts (<5%) could be reached after transpiration sum method on tomato and cucumber stands, without salt accumulations in the substrate. The yield and the growth of the plants were not affected.

The transpiration sum method can be controlled and monitored by tensiometers. For these purpose is a trend analysis of the substrate suction very helpful. The integration of plant growth and development models in to the irrigation algorithm is required for a precise water supply.

More studies are necessary on the suitability of the sums of radiation, VPD and  $VPd_{a-l}$ , which were calculated between in succession irrigation times, for modelling purposes. The efficiency of such an irrigation schedule on the basis of climate models could be monitored by the EPM-Phytomonitoring.

## LITERATURVERZEICHNIS

- ABBOTT,-J.D.; PEET,-M.M.; WILLITS,-D.H.; GOUGH,-R.E. 1985: Water management of greenhouse tomatoes. *Hort Science* 20, 688-690.
- ABBOTT,-J.D.; PEET,-M.M.; WILLITS,-D.H.; SANDERS,-D.C.; GOUGH,-R.E. 1986: Effects of irrigation frequency and scheduling on fruit production and radial fruit cracking in greenhouse tomatoes in soil beds and in soil less medium in bags. *Scientia Hort.* 28, 209-217.
- ADAMS,-P. 1990: Effects of watering on the yield, quality and composition of tomatoes grown in bags on peat. *J. Hort. Sci.* 65, 667-674.
- ANGELAKIS,-A.N.; TCHOBANOGLIOUS,-G. 1997: Necessity of establishing EU-Guidelines for wastewater reclamation and reuse: with emphasis the EU-Mediterranean countries. *Acta Hort.*, 449, 673-682.
- AUERSWALD,-H.; DREWS,-M.; KRUMBEIN,-A. 1996: Der Einfluss unterschiedlicher Anbauverfahren auf Merkmale der inneren Qualität von Gewächshaus-tomaten im Jahresverlauf. *Gartenbauwissenschaft*, 61 (2), 77-83.
- BAAS,-R.; STRAVER,-N.A. 2001: In situ monitoring water content and EC in soil less media using a FD sensor. *Acta Hort.*, 562, 295-303.
- BAILEY,-B.J.; DAY,-W. 1999: The use of models in greenhouse environmental control. *Acta Hort.*, 486, 93-99.
- BAILLE,-A. 1992: Water status monitoring in greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 304, 15-27.
- BAILLE,-A. 1994: Irrigation Management strategy of greenhouse crops in Mediterranean countries. *Acta Hort.*, 361, 105-121.
- BAILLE,-M. ; BAILLE,-A.; DELMON,- D. 1994: Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71(1-2), 83-97.
- BAKKER, J.C. 1991: Leaf conductance of four glasshouse vegetable crops as affected by air humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55, 23-36.
- BAOUDOIN,-W.O. 1999: Protected cultivation in the Mediterranean region. *Acta Hort.* 486, 23-30.
- BASIOUNY,-F.M.; BASIOUNY,-K.; MALONEY,-M. 1994: Influence of water stress on abscisic acid and ethylene production in tomato under different PAR levels. *J. Hort. Sci.* 69, 535-541.
- BECK,-M. 2000: Strategien zur Steuerung der Bewässerung im Gewächshaus und Konsequenzen für die Strukturierung von Leitrechnersystemen. Dissertation, Landwirtschaftliche-Gärtnerische-Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin.

- 
- BECK,-M.; FRENZ,-F.W.; SCHLERETH,-H. 1995: Weiterentwicklung bei KliWaDu. Deutscher Gartenbau, 39, 2291-2293.
- BECK,-M.; SCHLERETH,-H.; FRENZ,-F.W. 1995: Umweltgerechte Bewässerung. Deutscher Gartenbau, 39, 2282-2286.
- BECK,-M.; SCHLERETH,-H.; FRENZ,-F.W. 1995: Umweltgerechte Düngung. Deutscher Gartenbau, 39, 2288-2290.
- BOARI,-F.; CANTORE,-V.; RUBINO,-P.; De PALMA,-E. 2000: Evapotranspiration Trend in Seed Propagated Artichoke (*Cynara cardunculus* L. var. *Scolymus* L.) Fiori, in Southern Italy. *Acta Hort.* 537, 511-518.
- BÖHME,-M 1996: Influence of closed systems on the development of cucumber. *ISOSC Proceedings*, 75-85.
- BORMANN,-M.W.; LIEBIG,-H.P. 2002: Ultrasonic Acoustic Emission of Broccoli (*Brassica oleracea* L. convar. *Botrytis* var. *Italica* Plenck) to indicate Water Stress. *Acta Hort.*, 593, 25-32.
- BOTTOMLEY,-P.A.; ROGERS,-H.H.; PRIOR,-S.A. 1993: NMR imaging of root water distribution in intact *Vicia faba* L. plants in elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Cell Environ.*, 16, 335-338.
- BOULARD,-T.; JEMAA,-R. 1993: Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Hort.*, 335, 381- 387.
- BOULARD,-T.; JEMAA,-R.; BAILLE,-A. 1997: Validation of a greenhouse tomato crop transpiration model in Mediterranean conditions. *Acta Hort.*, 449; 551-559.
- BOULARD,-T.; WANG,-S. 2000: Greenhouse crop transpiration model from external climate conditions. *Acta Hort.*, 2000, 235-244.
- BRAZAITYTE,-A. 1999: Importance of environmental factors for the intensity of Tomato photosynthesis. *BIOLOGIJA*, No. 1, 73-75.
- BRAZAITYTE,-A. 2000: PHYTOMONITORING Investigations of physiology of tomato productivity and resistance. *Sodinikyste Ir Darzininkyste*, 19 (3), 25-40.
- BRAZAITYTE,-A.; DUCHOWSKI,-P. 1999: Monitoring of dynamics of tomato Svara physiological parameters and environmental factors and their interrelation. *Sodinikyste Ir Darzininkyste*, 18 (3), 312-320.
- BRAZAITYTE,-A.; JANKAUSKIENE,-J. 2000: Investigations of physiological processes of tomato in different greenhouse using Phytomonitoring equipment and methodology. *Sodinikyste Ir Darzininkyste*, 19 (4), 54-61.

- BRUN,-R.; TOURNIER,-J.P. 1992: Micrometry Measurement of stem diameter changes as a means to detect nutritional stress of tomato plants. *Acta Hort.*, 304, 265-268.
- CAMPBELL,-G.S. 1988: Soil Water Potential Measurement: An Overview. *Irrigation Science*, 9, 265-273.
- CANDIDO,-V.; MICCOLIS,-V.; PERNIOLA,-M.; RIVELLI,-A.R. 2000: Water Use, Water Use Efficiency and Yield Response of "Long Time Storage" Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta Hort.* 537, 789-798.
- CASTELLVI,-F.; PEREZ,-P.J.; VILLAR,-J.M.; ROSELL,-J.I. 1996: Analysis of methods for estimating vapour pressure deficits and relative humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82, 29-45.
- CHALLA,-H. 2001: Modelling for present production problems in greenhouse horticulture in mild winter climates. *Acta Hort.*, 559, 431-440.
- CHOI,-E.Y.; Lee,-Y.B.; KIM,-J.Y. 2001: Nutrient uptake, growth and yield of cucumber cultivated with different growing substrates under a closed and an open system. *Acta Hort.*, 548, 543-549.
- CHOUDHURY,-B.J.; MONTEITH,-J.L. 1986: Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36, 215-225.
- CLIFFORD,-S.C.; STRONACH,-I.M.; BLACK,-C.R.; SINGLETON-JONES,-P.R.; AZAM-ALI,-S.N.; CROUT,-N.M.J. 2000: Effects of elevated CO<sub>2</sub> drought and temperature on the water relations and gas exchange of groundnut (*Arachis hypogaea*) stands grown in controlled environment glasshouses. *Physiologia Plantarum*, 110, 78-88.
- COHEN,-M.; SAVE,-R.; BIEL,-C.; MARFA,-O. 1998: Simultaneous measurement of water stress with LVDT sensors and electrotensiometers: Application in pepper plants grown in two types of perlite. *Acta Hort.*, 421, 193-199.
- CSIZINSZKY,-A.A. 1993: Politics of water use and its effect on water research of horticultural crops: Introduction to the colloquium. *HortScience*, 28 (4), 282-283.
- DA SILVA,-F.F.; WALLACH,-R.; CHEN,-Y. 1995: Hydraulic properties of rock wool slabs used as substrates in horticulture. *Acta Hort.*, 401, 71-75.
- DAUDET,-F.A.; LE ROUX,-X.; SINOQUET,-H. 2000: Use of a 3D plant/canopy structure-based model of gas and energy transfers to assess the water requirements of trees and orchards. *Acta Hort.*, 537, 103-111.
- DE GRAAF,-R.; ESMEIJER,-M.H. 1998: Comparing calculated and measured water consumption in a study of the (minimal) transpiration of cucumber grown on rock wool. *Acta Hort.*, 458, 103-110.

- 
- DINAR,-A. 1993: Economic factor and opportunities as determinants of water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 14, 47-52.
- DOMKE,-O. 1993: Bewässerungsdüngung EC-kontrolliert und –geregelt. KTBL Arbeitsblatt Gartenbau, *Lfd. Nr. 0671*.
- DOMKE,-O. 1994: Regeltechnik im Gewächshaus. *Taspo-Gartenbaumagazin*, 3(9), 36-39.
- DORAIS,-M.; PAPADOPOULOS,-A.; GOSSELIN,-A. 2001: Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie*, 21, 367-383.
- DUPLANCIC,-M.C.; RODRIGUEZ,-E.M. 1996: Economic evaluation of tomato in soil less culture compared with culture in soil. *ISOSC Proceedings*, 147-153.
- EAMUS,-D. 1991: The interaction of rising CO<sub>2</sub> and temperature with water use efficiency. *Plant, Cell and Environment*, 14, 843-852.
- EHRET,-D.L.; LAU,-A.; BITTMAN,-S.; LIN,-W.; SHELFORD,-T. 2001: Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*, 21, 403-414.
- FERERES,-E 1997: Irrigation scheduling of horticultural crops. *Acta Hort.*, 449, 253-258.
- FICK,-A.; KELLER,-H.B. 2000: Modellierung des Verhaltens Dynamischer Systeme mit erweiterten Fuzzyregeln. Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte.
- FÖRTSCH,-C.; SCHMIDT,-U. 1990: Technische Möglichkeiten der Entwicklung von Sensortechnik zur optimalen Klimaerfassung in Gewächshäusern. *Gartenbau*, 37, 10, 319-320.
- FRENZ,-F.W. 1980: Steuergeräte für die Bewässerung im Gartenbau. KTBL Landtechnik, Technik im Gartenbau unter Glas, 0624.
- GIELING,-Th.H. 1998: Sensors and measurement, a review. *Acta Hort.*, 421, 19-33.
- GIELING,-Th.H. 2001: Control of water supply and specific nutrient application in closed growing systems. Dissertation, Wageningen University.
- GIELING,-Th.H.; SCHURER,-K. 1994: Sensors for information acquisition and control. Northeast Regional Agricultural Engineering Servis, Ithaca, NY, *Pub. No. 72*, 16-31. *Proc. Greenhouse Systems, Automation, Culture, and Environment Int. Conf.*, New Brunswick, NJ.
- GLOVER,-J. 1974: The rate of apparent photosynthesis of whole sugarcane plants. *Annals of Botany*, 38, 909-920.
- GOUDRIAAN,-J.; VAN LAAR,-H.H. 1994: Modelling Potential Crop Growth Process. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 69.94.

- GRILLAS,-S.; LUCAS,-M.; BARDOPOULOU,-E.; SARRAFOPOULOS,-S. 2001 : Perlite based soil less culture systems : current commercial applications and pro-spects. *Acta Hort.*, 548, 105-113.
- GÜL,-A.; TÜZEL,-I.H.; TUNCAY,-Ö.; ELTEZ,-R.Z.; ZENCIRKIRAN,-E. 1999: Soil less culture of cucumber in glasshouses: I. A comparison of open and closed systems on growth, yield and quality. *Acta Hort.*, 486, 1999, 389-393.
- GYSI,-C.; Von ALLMEN,-F. 1996: Environmental aspects of soil less culture in Switzerland; comparison of different systems. *ISOSC Proceedings*, 173-184.
- HARTMANN,-B. 1995: Sensible Sensoren für die Bodenfeuchte. *TASPO-Gartenbaumagazin*, 10-12.
- HARTUNG,-W.; RADIN,-J.W.; HENDRIX,-D.L. 1988: Absciscic acid movement into the apoplastic solution of water stressed cotton leaves. Role of apoplastic pH. *Plant Physiol.*, 86, 908-913.
- HASHIMOTO,-Y. 1989: Recent strategies of optimal growth regulation by speaking plant concept. *Acta Hort.*, 260, 115-121.
- HEISSNER,-A. 1997: Der CO<sub>2</sub>-Gaswechsel von Paprikapflanzen in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke, der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Lufttemperatur und dem Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft: Messungen und Modell. *Gartenbauwissenschaft*, 62(2), 78-90.
- HEISSNER,-A. 1997: Die Transpiration von Paprika im Gewächshaus: Messungen und Modellierung. *Gartenbauwissenschaft*, 62(5), 228-236.
- HEISSNER,-A. 1998: CO<sub>2</sub>-Gaswechsel und Wasseraufnahme von Paprikapflanzen unter den Bedingungen von Wasserstress. *Gartenbauwissenschaft*, 63 (4), 177-184.
- HEISSNER,-A.; KLÄRING,-H.-P- 1994: Simulation of dry matter production of tomato in a glass and a plastic greenhouse based on a CO<sub>2</sub> gas exchange model (in German). *Inst. Veg. Orn. Crops. Annual Report 1992/93*: 45.
- HERPPICH,-W. B.; VON WILLERT,-D.J. 1995: Dynamic changes in leaf bulk water relations during stomatal oscillations in mangrove species. Continuous analysis using a dew point hygrometer. *Physiologia Plantarum*, 94, 479-485.
- HEUVELINK,-E. 1999: Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Ann. Bot.* 83: 413-422.
- HÖFERT,-U.; WIMMER,-R.; BECK,-M.; FRENZ,-F.W. 1994: Kein Austropfen bei Gefälle. *Deutscher Gartenbau*, 50, 2974-2978.
- HOLTZ,-G. 2001: Online Referat. Anwendung von fuzzy regelbasierter Modellierung auf dynamische Systeme. Universität Osnabrück, Institut für Umweltsystemforschung.

- HSIAO,-T.C.; XU,-L.-K. 2000: Predicting water use efficiency of crops. *Acta Hort.*, 537, 199-206.
- IBS Gewächshaustechnik & Beratung 2003: EPM-Handbuch.
- ISHIDA,-T.; CAMPBELL,-G.S.; CALISSENDORFF,-C. 1991: Improved heat balance method for determining sap flow rate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56, 35-48.
- JACKSON,-R.D.; IDSO,-S.B.; REGINATO,-R.J.; PINTER JR,-P.J. 1981: Canopy temperature as a stress indicator. *Water Resour. Res.*, 17, 1133.
- JACKSON,-R.D.; KUSTAS,-W.P.; CHOUDHURY,-B.J. 1988: A re-examination of the Crop Canopy Stress Index. *Irrigation Science*, 9, 309-317.
- JACOB,-F.; JÄGER,-E.J.; OHMANN,-E 1994: Botanik. 4. Auflage- Jena, Gustav Fischer Verlag.
- JOILLET,-O. 1993: Modelling of water uptake, transpiration and humidity in greenhouse, and of their effects on crops. *Acta Hort.*, 328, 69-77.
- JOILLET,-O.; BAILEY,-B.J. 1992: The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses; Measurements and models comparison. *Agricultural and forest meteorology*, 58(1-2),43-62.
- JONES,-H.G. 1992: Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd ed.- Cambridge: University Press.
- JONES,-H.G. 1997: New concepts in plant water relations: relevance to horticultural production. *Acta Hort.*, 449, 371-378.
- KAPLAN,-M.; KADIROGLU,-A.; DURCEYLAN,-M.E.; SENER,-H.R. 1999: Effects of salinity and fertigation on Tomato. *Acta Hort.*, 486, 277-281.
- KATSOULAS,-N.; BAILLE,-A.; KITTAS,-C. 2002: Influence of LAI on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. *Biosystem Engineering*, 83 (3), 349-359.
- KIRDA,-C.; CEVIK,-B.; TÜLÜCÜ,-K. 1994: A simple method to estimate the irrigation water requirement of greenhouse grown tomato. *Acta Hort.*, 366, 373-380.
- KITANO,-M.; HAMAKOGA,-M.; EGUCHI,-H. 1990: Physical evaluation of effective evaporative demand with reference to plant water relations. *Biotronics*, 19, 109-119.
- KLÄRING,-H.P. 2001: Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops. A review. *Agronomie*, 21, 311-321.
- KLÄRING,-H.P.; CIERPINSKI,-W. 1998: Control of nutrient solution concentration depending on greenhouse climate in a sweet pepper crop. *Acta Hort.*, 458, 141-146.

- KLÄRING,-H.P.; SCHWARZ,-D.; CIERPINSKI,.W. 1999: Control of concentration of nutrient solution in soil less growing systems, depending on greenhouse climate- Advantages and Limitations. *Acta Hort.*, 507, 133-139.
- KOPYT,-M.; TON,-Y.; BEN NER,-Z. ; BACHRACH,-A. ; ZIESLIN,-N. (ed.); AGBARIA,-H. 2001: A trial of the Phytomonitoring technique for roses. *Acta Hort.*, 547, 205-212.
- LANGENSIEPEN,-M. 1995: Einführung in die Grundlagen der thermoelektrischen Saftstrommessung von Pflanzen: Ein Vergleich zwischen Wärmebilanzverfahren und Wärmeimpulsmethode. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft, Heft 1*, 53-71.
- LARCHER,-W. 1994: *Ökophysiologie der Pflanze*. 5. Auflage – Stuttgart: Ulmer Verlag.
- LETEY,-J. 1993: Relationship between salinity and efficient water use. *Irrigation Science*, 14, 75-84.
- LIBBERT,-E. 1987: *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie*. Jena - Gustav Fischer Verlag.
- LIEBIG,-H.-P.; LIPPERT,-F. 1999: Optimisation of water and nutrient dosing by modelling and using feedback control measures. *Acta Hort.*, 507, 165-171.
- LÖPMEIER,-F.J. 1994: Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 2, 157-167.
- LORENZO,-P.; MEDRANO,-E.; SANCHEZ- CUERRERO,-M.C. 1998: Green-house crop transpiration: an implement to soil less irrigation management. *Acta Hort.*, 458, 113-119.
- LÖSCH,-R. 2001: *Wasserhaushalt der Pflanzen*, 1. Auflage – Wiebelsheim: Quelle und Meyer Verlag.
- LOVEYS,-B.R.; DRY,-P.R.; STOLL,-M.; MCCARTHY,-M.G. 2000: Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Hort.*, 537, 187-197.
- MACKROTH,-K. 1993: Regelung und Steuerung bei der Bewässerung in Gewächshäusern. KTBL- Arbeitsblätter Gartenbau, *Lfd. Nr. 0649*.
- MALOUPA,-I.; PAPADOPOULOS,-A.; BLADENOPOULOU,-S. 1993: Evapotranspiration and preliminary coefficient of gerbera soil less culture grown in plastic greenhouse. *Acta Hort.*, 335, 519-526.
- MANIG,-W. 1998: Die Bedeutung des Wasserpreises für den ökonomischen Einsatz einer knapper werdenden Ressource in Bewässerungssystemen. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 33. Jahrg., 22, 197-209.



- MARSHALL,-B.; BISCOE,-P.V. 1980 b: A model for C3 leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance – II. Application to the analysis of flag leaf photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 120 (31), 41-48.
- MAVROGIANNOPOULOS,-G.N. 1994: *Idroponikes Kalliergies* (Hydroponische Kulturen). 1. Auflage – Athen, Pireaus: Stamoulis Verlag.
- McAVOY,-R. 1995: Don't let your tomatoes crack up. – Here's how to prevent those unsightly and profit-robbing-cracks on fruit. *Amer. Veget. Grower*. August. P., 46-47.
- McKENNEY,-M.S.; ROSENBERG,-N.J. 1993: Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64, 81-110.
- MEINKEN,-E.; FISCHER,-P. 1996: Im Blähton bei Hydrokulturen reichern sich Nährstoffe an. *TASPO - Gartenbaumagazin*, 35-36.
- MITCHELL,-J.P.; SHENNAN,-C.; GRATTAN,-S.R.; MAY,-D.M. 1991: Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 116, 215-221.
- MOHR,-H.; SCHOPFER,-P. 1992: *Pflanzenphysiologie*. Berlin: Springer Verlag.
- MONTEITH,-J.L.; CAMBELL,-G.S.; POTTER,-E.A. 1988: Theory and performance of a dynamic diffusion porometer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 44, 27-38.
- MORARD,-P. 1996: Possible use of ion selective electrodes for nutrient solutions in recirculated systems. *ISOSC Proceedings*, 291-298.
- MURASE,-H. 2000: Computer applications and "Phytotechnology" in horticulture. *Acta Hort.*, 519, 19-35.
- NEDERHOFF,-E.M.; GIJZEN,-H.; VEGTER J.G.; RIJSDIJK,-A.A. 1989: Dynamic model for greenhouse crop photosynthesis: validation by measurements and application for CO2 optimisation. *Acta Hort.*, 260, 137-147.
- NEETESON,-J.J.; BOOIJ,-R.; WHITMORE,-A.P. 1999: A review on sustainable nitrogen management in intensive vegetable production systems. *Acta Hort.* 506, 17-26.
- NEETESON,-J.J.; CARTON,-O.T. 2001: The Environmental Impact of Nitrogen in Field Vegetable Production. *Acta Hort.* 563, 21-28.
- NORRIE,-J.; GRAHAM,-M.E.D.; GOSSELIN,-A. 1994: Potential Evapotranspiration as a Means of Predicting Irrigation Timing in Greenhouse Tomatoes Grown in Peat Bags. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 119 (2), 163-168.
- NOVAK,-V.A. 1997: Phytomonitoring in plant physiology: Organisation, arrangement and possibilities. *Russian J. Plant Physiol.* 44, 121-128.

- OKUSHIMA,-L.; SASE,-S.; OHTANI,-T.; SHIMOJYO,-M.; HOGO,-Y. 1998: Plant measurement by acoustic emission sensor. *Acta Hort.*, 421, 241-248.
- OR,-D.; COELHO,-F.E. 1996: Soil dynamics under drip irrigation: Transient flow and uptake models. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 2017-2025.
- OSVALD,-J.; PETROVIC,-N. 1996: Comparison of hydroponic and soil cultivation of chosen solanaceae varieties in protected, non-heated areas. *ISOSC Proceedings*, 329-340.
- PASCHOLD,-P.J. 1993 a: Ermittlung des Wasserbedarfs von Gemüse im Freiland für eine effiziente Bewässerung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 2, 161-174.
- PASCHOLD,-P.J. 1993: Bedarfsorientierte Bewässerung- Entscheidend für Qualitätsgemüse im Freiland. *Gb Gw*, 16, 756-759.
- PASCHOLD,-P.J.; KLEBER,-J. 1995: Tröpfchenweise Gießen im Gewächshaus. *TASPO - Gartenbaumagazin*, 22-24.
- PASCHOLD,-P.J.; WIETHALER,-A. 1999: Sensoren zur Steuerung der Bewässerung bei Freilandgemüse. *Gemüse*, 2, 93-96.
- PEET,-M.M. 1992: Fruit cracking in tomato. *HortTechnology* 2, 216-223.
- PEET,-M.M.; WILLITTS,-D.H. 1995: Role of excess water in tomato fruit cracking. *HortScience* 30, 65-68.
- PENUELAS,-J; SAVE,-R; MARFA,-O.; SERRANO,-L. 1992: Remotely measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 63-77.
- PHYTECH LTD. 1998: User's Reference Guide (Brochure).
- PICKERING,-N.B.; JONES,-J.W.; BOOTE,-K.J. 1993: Evaluation of the portable chamber technique for measuring canopy gas exchange by crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63, 239-254.
- PINTO,-J.M.; BOTREL,-T.A.; MACHADO,-E.C.; FEITOSA FILHO,-J.C. 2000: The effects of CO<sub>2</sub> applied through irrigation water on melon crop in protected cultivation. *Acta Hort.*, 537, 267-272.
- PULUPOL,-L.U.; BEHBOUDIAN,-M.H.; FISHER,-K.J. 1996: Growth, yield, and post harvest attributes of glasshouse tomatoes produced under deficit irrigation. *HortScience* 31, 926-929.
- QIU,-G.Y.; MIYAMOTO,-K.; SASE,-S.; OKUSHIMA,-L. 2000: Detection of crop transpiration and water stress by temperature-related approach under field and greenhouse conditions. *JARQ*, 34, 29-37.

- 
- RAGAB,-R.; PRUDHOMME,-C. 2002: Climate Change and Water Resources Management in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for the 21st Century. *Biosystem Engineering*, 81 (1), 3-34.
- RANA,-G.; MASTRORILLI,-M.; KATERGJI,-N. 2000: An Evapotranspiration model adapted to water stressed crops. *Acta Hort.*, 537, 95-101.
- RANASINGHE,-M.S.; MILBURN,-J.A. 1995: Xylem conduction and cavitation in *Hevea brasiliensis*. *J. Exp. Bot.* 46: 1693-1700.
- RICHARDS,-R.A.; LOPEZ-CASTANEDA,-C.; GOMEZ-MACPHERSON,-H.; CONDON,-A.G. 1993: Improving the efficiency of water use by plant breeding and molecular biology. *Irrigation Science*, 14, 93-104.
- RITMAN,-K.T.; MILBURN,-J.A. 1988: Acoustic Emissions from Plants: Ultrasonic and Audible Compared. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 39, No. 206, 1237-1248.
- RIVIERE,-L.M.; CHASSERIAUX,-G. 1999: Different ways of monitoring the irrigation of container and pot plants. *Acta Hort.*, 481, 353-360.
- ROSE,-A.; ROSE,-M.A. 1998: Performance of sap flow gauge on Rose. *Acta Hort.*, 421, 201-207.
- RÖSSLER,-U.; ROTH,-D. 1998: Literaturübersicht zum Stand und zur Anwendung der Infrarot-Thermometrie für die Kennzeichnung des Wasserversorgungszustandes von Kulturpflanzenbestände unter Feldbedingungen. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, Heft 1, 69-85.
- SCHACHT,-H.; SCHENK,-M. 1994: Steuerung der Düngung von Gewächshausgurken (*Cucumis sativus* L.) in geschlossenen erdlosen Kultursystemen mit Hilfe von Nitrat- und Amino- N-Gehalt im Blattstielpresssaft. *Gartenbauwissenschaft*, 59(3), 97-102.
- SCHACHT,-H.; SCHENK,-M. 1995: Steuerung der Düngung von Gewächshausgurken (*Cucumis sativus* L.) in geschlossenen Nährlösungssystemen mit Hilfe eines Simulationsmodells. *Gartenbauwissenschaft*, 60(2), 77-85.
- SCHEFFER,-F.; SCHACHTSCHABEL,-P. 1998: Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage – Stuttgart: Enke Verlag.
- SCHMIDT,-U. 1989: Die Temperatur des Pflanzenbestandes als Regelgröße für die Klimaregelung im Gewächshaus unter besonderer Berücksichtigung der Heizungsregelung. Dissertation A. Ingenieurhochschule Berlin- Wartenberg.
- SCHMIDT,-U. 1996: Hat die Prozessautomatisierung im Gewächshaus eine Zukunft? *Gemüse*, 1, 18-23.
- SCHMIDT,-U. 1998: Low-cost system for on-line measurement of plant transpiration and photosynthesis in greenhouse production. *Acta Hort.*, 421, 249-257.

- SCHMIDT,-U. 2002: Modelling of Stomatal Conductivity as a Variable for Environmental Control in Greenhouses. *Acta Hort.*, 593, 227-234.
- SCHMIDT,-U.; KÖHLER,-L. 1995: Ist die Gewächshauskonstruktion dicht, kann die Luftfeuchte zum Problem werden. *TASPO - Gartenbaumagazin*, 33-37.
- SCHNITZLER,-W.H.; MICHALSKY,-F. 1996: Experience and problems of growing tomatoes in expanded clay aggregate. *ISOSC Proceedings*, 361-373.
- SCHRAGE,-R. 1999: Zierpflanzenbau muss Wassermengen beachten! *TASPO-Gartenbaumagazin*, 42-43.
- SCHREVEENS,-E.; DE BAERDEMAEKER,-J.; VERVAEKE,-F. 1992: Thermal conductivity as a measure of moisture content of inert substrates. *Acta Hort.*, 304, 245-252.
- SCHRÖDER,-F.G. 1994: Plant Plane Hydroponic. A new hydroponic system in Europe - An update. *Proceedings of the 17th conference of the Hydroponics Society of America*, 27-39.
- SCHURER,-K.; HILHORST,-M.A. 1998: Sensing moisture in soils and sub-strates. *Acta Hort.*, 421, 179-184.
- SCHURR,-U.; GOLLAN,-T.; SCHULZE,-E.D. 1992: Stomatal response to drying soil to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. II. Stomatal sensitivity to abscisic acid imported from the xylem sap. *Plant Cell Environ.*, 15, 561-567.
- SHARON,-Y.; BRAVDO,-B. 2001: A fully-automated orchard irrigation system based on continuous monitoring of turgor potential with a leaf sensor. *Acta Hort.*, 562, 55-61.
- SIMONNEAU,-T.; HABIB,-R.; GOUTOULY,-J.P.; HUGUET,-J.G. 1993: Diurnal Changes in Stem Diameter Depend Upon Variations in Water Content: Direct Evidence in Peach Trees. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 44, No. 260, 615-621.
- SNYDER,-R.L.; PAWU,-K.T.; DUCE,-P.; SPANO,-D.; FERREIRA,-M.I.; DO PACO,-T.A.; CONNELL,-J.H. 2000: Measuring tree and vine ET with Eddy Covariance. *Acta Hort.*, 537, 53-60.
- SOURELL,-H 1998: Welche Berechnungstechnik werden wir im 21. Jahrhundert einsetzen? *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 33. Jahrg., 2, 249-260.
- SOURELL,-H; SCHMITZ,-M. 1997: Kein Messverfahren arbeitet optimal. *Landtechnik*, 10, 40-42.
- STANGHELLINI,-C 1987: Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. Ph. D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen.
- STANGHELLINI,-C. 1993: Evapotranspiration in greenhouses with special reference to Mediterranean conditions. *Acta Hort.*, 335, 295-304.

- 
- STANGHELLINI,-C.; DE JONG,-T. 1995: A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76, 129-148.
- STANGHELLINI,-C.; DE LORENZI,-F. 1994: A comparison of soil- and canopy temperature-based methods for the early detection of water stress in a simulated patch of pasture. *Irrigation Science*, 14, 141-146.
- STEINBACHER,-F.; WEHRENFENNIG,-M.; HAUSER,-B. 1995: Homogene Bestände durch kürzere Gießrhythmen. *Deutscher Gartenbau*, 30, 1790-1793.
- STRADIOT,-P. 2001: The grodan water content meter for root management in stone wool. *Acta Hort.*, 548, 71-77.
- STÜTZEL,-H.; KAHLEN,-K. 2004: Do we need new approaches for horticultural crop modelling? *Acta Hort.*, 654, 165- 169.
- SWANSON,-R.H. 1994: Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, 113-132.
- TANTAU,-H.J. 1987: Estimation of the relative opening of leaf stomata using energy balances. *Gartenbauwissenschaft*, 52, 94-96.
- TANTAU,-H.J. 1992: Estimation of the relative opening of the leaf stomata using energy balances. *Acta Hort.*, 304, 167-171.
- TEKINEL,-O.; CEVIK,-B. 1994: Recent developments in greenhouse crop irrigation in the Mediterranean region. *Acta Hort.* 366 , 353-364.
- TEN BERGE,-H.F.M.; VAN DER MEER,-H.G.; CARLIER,-L.; BAAN HOFMAN,-T.; NEETESON,-J.J. 2002: Limits to nitrogen use on grassland. *Environmental Pollution* 118, 225-238.
- TITULAER,-H. 1999: How to manage nitrogen fertilisation for vegetable crops in accordance with government regulations in the Netherlands. *Acta Hort.* 1999, 161-165.
- TON,-Y.; NILOV,-N.; KOPYT,-M. 2001: Phytomonitoring: The New Information Technology for Improving Crop Production. *Acta Hort.*, 562, 257-262.
- TUZEL,-I.H.; TUZEL,-Y.; GUL,-A.; MERIC,-M.K.; YAVUZ,-O.; ELTEZ,-R.Z. 2001: Comparison of open and closed systems on yield, water and nutrient consumption and their environmental impact. *Acta Hort.*, 554, 93-97.
- VAN DE SANDEN,-P.A.C.M.; DE JAGER,-P.A.; REINDERS,-J.E.A.; VAN AS,-H. 1992: Stem sap flow, measured using proton nuclear magnetic resonance, in comparison with transpiration and water uptake of cucumber in a greenhouse climate. *Acta Hort.*, 304, 237-243.
- VAN MEURS,-W.T.M.; STANGHELLINI,-C. 1992: Use of an off-the-shelf electronic balance for monitoring crop transpiration in greenhouses. *Acta Hort.*, 304, 219-225.

- 
- VAN OS,-E.A. 1992: NMR IN HORTICULTURE: in situ plant water balance studies with NMR. *Acta Hort.*, 304, 103-112.
- VAN OS,-E.A. 1999: Closed soil less growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. *Water Science and Technology*, 39 (5), 105-112.
- VILLAGRA,-M.M.; BACCHI,-O.O.S.; TUON,-R.L.; REICHARDT,-K 1995: Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, 317-325.
- VOGEL,-G.; GÖHLER,-F. 1991: Anwendung erdloser Kulturverfahren- ein Erfordernis unserer Zeit. *Gartenbau*, 38(8), 4-7.
- VON BAMBACH,-G. 1993: Bewässerung nach Pflanzenbedarf. Tensiometer übernehmen die Führung unter Glas. *Gemüse*, 29(2), 78-81.
- VON BAMBACH,-G.; RICHTER,-O. 1994: Schalltensiometer oder Solintegrator? *Deutscher Gartenbau*, 16, 966-967.
- VON KJELGAARD,-J.F.; STOCKLE,-C.O.; EVANS,-R.G. 1996: Accuracy of canopy temperature energy balance for determining daily evapotranspiration. *Irrigation Science*, 16, 149-157.
- VOOGT,-W. 1999: Water and mineral balances of organically grown vegetables under glass. *Acta Hort.* 506, 51-57.
- VOOGT,-W.; KIPP,-J.A.; DE GRAAF,-R.; SPAANS,-L. 2000: A fertigation model for glasshouse crops grown in soil. *Acta Hort.*, 537, 495-502.
- WAKOH,-H.; HIRANO,-T. 1992: Measurement of water content in solid media using of porous alumina sensors. *Acta Hort.*, 304, 253-258.
- WANG,-S.; DELTOUR,-J. 1999: An experimental model for leaf temperature of greenhouse-grown tomato. *Acta Hort.*, 486, 101-106.
- WEIBEL,-F.P.; BOERSMA,-K. 1995: An improved stem heat balance method using analogue heat control. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75, 191-208.
- WERKHOVEN,-C.; VAN OS,-E.A. 1998: Measuring of the water content of greenhouse soil by TDR, FD and Tensiometers. *Acta Hort.*, 421, 171-177.
- WERKHOVEN,-C. 1992: Sensors for irrigation scheduling of cultures in the field. *Acta Hort.*, 304, 259-264.
- WISSMANN,-B.C., THULKE,-H.H.; WISSEL,-C. 09/2003: UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig- Halle, Sektion Ökosystemanalyse. Ökologische Modellierung. Internetseite: [www.weidelandchaft.de/det\\_modell.html](http://www.weidelandchaft.de/det_modell.html).
- XILOYIANNIS,-C.; NUZZO,-V.; DICHIO,-B. ; CELANO,-G.; MONTANARO,-G. 2000: Characterization of training systems in relation to water use efficiency in apricot and kiwifruit plants. *Acta Hort.*, 537, 207-213.

- 
- XU,-H.L.; GAUTHIER,-L.; GOSSELIN,-A. 1995: Stomatal and cuticular transpiration of greenhouse tomato plants in response to high solution electrical conductivity and low soil water content. *American Society for Horticultural Science*, 120(3), 417-422.
- XU,-H.L.; GAUTHIER,-L.; GOSSELIN,-A. 1997: Greenhouse tomato photosynthetic acclimation to water deficit and response to salt accumulation in the substrate. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 65 (4), 777-784.
- YANG,-.; SHORT,-.; FOX,-.; BAUERLE,-. 1990: Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51(3), 197-209.
- ZABRI,-A.W.; BURRAGE,-S.W. 1998: The effects of vapour pressure deficit (VPD) and enrichment with CO<sub>2</sub> on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grown by NFT. *Acta Hort.* 458, 351-356.
- ZERCHE,-S. 1996: Im geschlossenen Anbau entweicht sehr viel Stickstoff über die Luft. *TASPO- Gartenbaumagazin*, 43-45.
- ZHANG,-L.; LEMEURE,-R.; GOUTORBE,-J.P. 1995: A one-layer resistance model for estimating regional evapotranspiration using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 241-261.
- ZHANG,-L.; LEMEURE,-R. 1992: Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 209-228.
- ZUR,-B.; BEN-HANAN,-U.; RIMMER,-A.; YARDENI,-A. 1994: Control of irrigation amount using velocity and position of wetting front. *Irrigation Science*, 14, 207-212.

## ANHANG A: VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb. 1: Einflüsse der Klimaveränderung auf den hydraulischen Kreis (RAGAB, 2002)	9
Abb. 2: Tagesverlauf des momentanen $WUE_{Ph}$ , der Nettophotosynthese und der Transpiration bei <i>Cucumis sativus</i>	21
Abb. 3: Kumulativer Tagesverlauf des $WUE_{Ph}$ , der Photosynthese (Ph) und der Transpiration (T) in einer achttägigen Zeitperiode bei <i>Cucumis sativus</i>	21
Abb. 4: Photosynthetische Wassernutzung bei Wassermangel: Tagessummen der Nettophoto-synthese (Ph) und der Transpiration (Tr) und der Quotient Ph/Tr von 6 Wochen alten Weizen-pflanzen bei Bodenaustrocknung (AHO et al., 1979 in: LARCHER, 1994)	22
Abb. 5: Abhängigkeit des Wasserpotenzials eines Sand- und Lehmbodens vom Wassergehalt des Bodens (LÖSCH, 2001)	28
Abb. 6: HÖFLER-Diagramm: Osmotischer Zustand und Wassergehalt einer Pflanzenzelle (LÖSCH, 2001)	29
Abb. 7: Abhängigkeit des Transpirationsmassenflusses ( $m_v$ ) von der Sättigungsdampfdruck-differenz ( $VCD_{l-b}$ ) bei a) <i>Capsicum annum</i> und b) <i>Lycopersicon esculentum</i>	32
Abb. 8: Elektrisches Analogiemodell des Transpirationsmassenflusses im Blattinneren (SCHMIDT, 2002)	34
Abb. 9: Modell der Regelung bzw. Steuerung des stomatären Gastransports (MOHR und SCHOPFER, 1992)	35
Abb. 10: Berechnung der $VCD_{l-b}$ im h,x - Mollier -Diagramm – Einfluss der klimatischen Faktoren	36
Abb. 11: „Mittagsdepression“ bei <i>Lycopersicon esculentum</i>	38
Abb. 12: Abhängigkeit des pflanzlichen Wasserbedarfs von der Einstrahlungssumme (SCHULTE, 1986 in: VON BAMBACH, 1993)	59
Abb. 13: Bestimmtheitsmaß des Wasserumsatzes in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter (Mittelwert aller Gießtakten und Gemüsearten) (BECK, 2000)	62



---

Abb. 14: Mehr elaborierte Modelle sind erforderlich, um ein höheres Niveau der Modellfunktion zu erreichen (MURASE, 2000)	74
Abb. 15: Generelle Ansicht der SF-Stängelflussensoren (PHYTECH Ltd., 1998)	78
Abb. 16: Technische und sensorische Ausstattung des Plantputer-Phytomonitor „EPM 2005“ (IBS, 2003)	79
Abb. 17: Entweichung der Kondensationsbildung im Gaswechsellmessgerät durch Erwärmung der Referenzluft auf dem Weg zur Dewarkammer - Graphische Erklärung im h,x- Mollier Diagramm (SCHMIDT, 1998)	80
Abb. 18: Optimale Luftstromgeschwindigkeit im EPM 2006 bei einer Küvettenmessfläche von 360 cm <sup>2</sup>	81
Abb. 19: Technische und sensorische Ausstattung des Plantputer-Phytomonitor „EPM 2006“ (IBS, 2003)	82
Abb. 20: Aufbau der Messtechnik in der Versuchsstation-Berlin	84
Abb. 21: Abweichungen zwischen einzelnen Tensiometer bei 50 und 60 hPa-Steuerung bei <i>Capsicum annum</i>	86
Abb. 22: Abweichungen der Saugspannung bei einer saugspannungsgeregelten Bewässerung (50 hPa) - <i>Lycopersicon esculentum</i>	86
Abb. 23: Abweichungen der Saugspannung in einer einstrahlungsreichen Periode bei einer saugspannungsgeregelten Bewässerung (50 hPa) - <i>Lycopersicon esculentum</i>	87
Abb. 24: Verlauf der Verdunstungsmassenstromdichte des in einer Küvette eingeschlossenen Fließpapiers und der kumulative Verdunstungsverlauf bei 8 ml Tropfmenge (blau: die Massenstromdichte, rot: die kumulative Menge)	88
Abb. 25: Die gemessenen Verdunstungsmengen und der Fehlerindikator zur Bestimmung des systematischen Messfehlers des EPM 2005	89
Abb. 26: Verlauf der momentanen Nettophotosynthese und der Transpirationsmassenstromdichte von zwei EPM 2006 Messgeräten an zwei unterschiedlichen Messorten der gleichen Bedingungen	90
Abb. 27: Korrelation der an zwei Messorten der gleichen Klimabedingungen und durch zwei EPM-Messgeräte gemessenen Bestandstranspirationsraten	90

Abb. 28: Korrelation der an zwei Messorten der gleichen Klimabedingungen und durch zwei EPM-Messgeräte gemessenen Nettophotosyntheseraten	91
Abb. 29: Verlauf der gemessenen Transpirationsmassenstromdichte und der Saftflussrate über mehrere Tagen - <i>Lycopersicon esculentum</i>	92
Abb. 30: Verlauf des Saftstroms und des $VPd_{l-b}$ - <i>Lycopersicon esculentum</i>	92
Abb. 31: Verlauf des Saftstroms, der Globalstrahlung und der Temperaturdifferenz zwischen Blatt und Luft - <i>Lycopersicon esculentum</i>	93
Abb. 32: Flussdiagramm zur saugspannungsgeregelten Bewässerung mit Hilfe von Tensio-metern - (* : Die Routine wird fünfmal abgefragt)	95
Abb. 33: Flussdiagramm zur transpirationssummengesteuerten Bewässerung mit Hilfe der Gaswechsellmessmethode	96
Abb. 34: Transpirationssummen und Zeitdauer zwischen zwei Gießtakten bei einer tensio-metergeregelten Bewässerung auf zwei Kulturtischen - <i>Capsicum anuum</i> - Schaltwert: 50 hPa	97
Abb. 35: Das tägliche Verhältnis der zugeführten Wassermenge ( $\Sigma B$ ) zu der Transpirationssumme ( $\Sigma T$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - <i>Capsicum anuum</i> - Schaltschwelle: 7,5 l Transpirationssumme	99
Abb. 36: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - <i>Lycopersicon esculentum</i> - Schaltschwelle: 7 l Transpirationssumme	101
Abb. 37: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen von den aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen einer transpirationssummen-gesteuerten Kultur - <i>Lycopersicon esculentum</i> ( $p < 0,001$ )	102
Abb. 38: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - <i>Gerbera jamensonii</i> - Schaltschwelle: 1,5 l Transpirationssumme	104
Abb. 39: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen einer transpirationssummengesteuerten Kultur von dem aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen - <i>Gerbera jamensonii</i> ( $p < 0,001$ )	105

- 
- Abb. 40: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Lycopersicon esculentum* - Schaltschwelle: 3 l Transpirationssumme 107
- Abb. 41: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen einer transpirationssummengesteuerten Kultur von den aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen - *Lycopersicon esculentum* ( $p < 0,001$ ) 108
- Abb. 42: Saugspannungsverlauf des Substrates in drei zufällig ausgewählten Standorten in einer transpirationssummengesteuerten Bewässerung - *Lycopersicon esculentum* – Schaltschwelle: 3 l 109
- Abb. 43: Der Verlauf der Transpirationsmassenstromdichte und des aus drei Tensiometer gebildeten Mittelwertes der Substratsaugspannung bei einer transpirationssummengesteuerten Bewässerung - *Lycopersicon esculentum* – Schaltschwelle: 3 l 110
- Abb. 44: Saugspannungsverlauf und gleitender Durchschnitt (144 Perioden. = 12 h) unter Transpirationssummen - und Saugspannungsteuerung der Bewässerung - *Lycopersicon esculentum* 110
- Abb. 45: Die täglichen Wasserbilanzen ( $\Sigma B = \Sigma T + A$ ) einer nach Transpirationssummen gesteuerten Kultur - *Gerbera jamensonii* - Schaltschwelle: 700 ml Transpirationssumme 112
- Abb. 46: Die Abhängigkeit der gemessenen täglichen Transpirationssummen einer transpirationssummengesteuerten Kultur von den aus der täglichen Bilanzberechnung ermittelten Transpirationssummen - *Gerbera jamensonii* ( $p < 0,001$ ) 113
- Abb. 47: Die täglich zugeführten Wassermengen  $\Sigma B$  und die Überschusswassermengen A einer zeitgesteuerten Bewässerung - *Gerbera jamensonii* 114
- Abb. 48: Der Anstieg des gleitenden Saugspannungstrends über 24 h bei unterschiedlichen Schaltschwellen der transpirationssummengesteuerten Bewässerung und der Verlauf der Saugspannung an zwei Standorten - *Lycopersicon esculentum* 117
- Abb. 49: Der Anstieg des gleitenden Saugspannungstrends über 24 h bei unterschiedlicher Schaltschwelle der

transpirationssummengesteuerten Bewässerung und der Verlauf der Saugspannung an zwei Standorten - <i>Cucumis sativus</i>	120
Abb. 50: Verlauf des $N_{\min}$ -Gehaltes im Substrat bei unterschiedlichen Bewässerungssteuerungs-varianten bei <i>Lycopersicon esculentum</i>	122
Abb. 51: Verlauf des $N_{\min}$ -Gehaltes im Substrat bei unterschiedlichen Bewässerungssteuerungs-varianten bei <i>Cucumis sativus</i>	122
Abb. 52: Verlauf des $N_{\min}$ -Gehaltes im Überschusswasser bei unterschiedlichen Steuerungsmethoden der Bewässerung bei <i>Lycopersicon esculentum</i>	123
Abb. 53: Verlauf des $N_{\min}$ -Gehaltes im Überschusswasser bei unterschiedlichen Steuerungsmethoden der Bewässerung bei <i>Cucumis sativus</i>	123
Abb. 54: Verlauf a) der EC der Nährlösung, des Drainagewasser und des Substrates und b) des pH bei drei Bewässerungssteuerungsmethoden bei <i>Lycopersicon esculentum</i>	125
Abb. 55: Verlauf a) der EC der Nährlösung, des Drainagewasser und des Substrates und b) des pH bei drei Bewässerungssteuerungsmethoden bei <i>Cucumis sativus</i>	127
Abb. 56: Stickstoffgehalt in den Blättern, Stielen und Früchten bei a) <i>Lycopersicon esculentum</i> und b) <i>Cucumis sativus</i> Pflanzen unter drei Steuerungsvarianten der Bewässerung	128
Abb. 57: Der Wassernutzungskoeffizient der Produktivität, die Transpiration und der LAI im Verlauf der Kulturperiode bei a) <i>Lycopersicon esculentum</i> und b) <i>Gerbera jamensonii</i>	130
Abb. 58: Vergleich des gesamten Ertrages, des durchschnittlichen Fruchtgewichtes und der Fruchtanzahl pro Pflanze zwischen den drei Steuerungsvarianten bei <i>Lycopersicon esculentum</i> (ANOVA, 5 % P)	133
Abb. 59: Flussdiagramm einer Bewässerungssteuerung anhand von online gemessenen Transpirationsmengen mit integrierter Saugspannungsüberwachung (Tensiometer)	152
Abb. 60: Berechnete Summen a) des $VPD_i$ b) der $VPD_{i-b}$ und c) der $R_n$ zwischen zwei fortlaufenden Gießtakten eines transpirationssummengesteuerten <i>Lycopersicon esculentum</i> Bestandes	154

---

Abb. 61: Modellgesteuerte Bewässerung mit sensorischer Überwachung	155
Abb. 62: Offene Bewässerungsführung einer Rinnenkultur auf Betontische bei <i>Capsicum anuum</i>	190
Abb. 63: Klimamessung am Paprikabestand durch das P-TF Gerät (Fa. POSITRONIK)	190
Abb. 64: a) Offene Bewässerungsführung von Containerkulturen auf Betontische von <i>Lycopersicon esculentum</i> und b) Transpirationsmessung durch den Phytomonitor „EPM 2006“	191
Abb. 65: Offene Bewässerungsführung von Containerkulturen in Perlit auf Tischen bei <i>Gerbera jamesonii</i>	191
Abb. 66: Messung der Globalstrahlung am Gerberabestand durch das Pyranometer CM5 (Fa. KIPP und ZONEN)	192
Abb. 67: a) Transpirationsmessung über das Küvettenprinzip und b) Saugspannungsmessung über das Tensiometerprinzip an einer Containerkultur auf Tische bei <i>Cucumis sativus</i>	192

## ANHANG B: VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tab. 1: Jährlicher EU-Wasserbedarf in verschiedenen Sektoren (WILLIAMS und MUSCO, 1992 in: ANGELAKIS et al., 1997)	10
Tab. 2: Die erlaubten Zugaberraten (kg/ha) für Stickstoff und Phosphat in Anlehnung des MINAS für Gemüseproduzenten (TITUALER, 1999)	13
Tab. 3: Maßnahmen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Tropfsystemen (HÖFERT et al. 1994; PASCHOLD et al., 1995; BECK et al., 1995)	14
Tab. 4: Bewertung der Bodenfeuchtesensoren	65
Tab. 5: Bewertung der Sensoren zur Messung von pflanzenphysiologischen Parameter	69
Tab. 6: Bewertung der Messmethoden	72
Tab. 7: Statistische Werte des prozentualen Verhältnis der Gießmenge zur gemessenen Transpirationssumme im Gießtakt ( $B'_w/\Sigma T$ ) bei einer saugspannungsgeregelten Bewässerung - <i>Capsicum annum</i> – Schaltschwelle: 50 hPa (Tukey's Test, 5%)	98
Tab. 8: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach den gemessenen Transpirationssummen gesteuerten Kultur - <i>Capsicum annum</i> - Schaltschwelle: 7,5 l Transpirationssumme	99
Tab. 9: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - <i>Lycopersicon esculentum</i> - Schaltschwelle: 7 l Transpirations-summe	101
Tab. 10: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - <i>Gerbera jamensonii</i> - Schaltschwelle: 1,5 l Transpirations-summe	104
Tab. 11: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - <i>Lycopersicon esculentum</i> - Schaltschwelle: 3 l Transpirations-summe	107
Tab. 12: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der Saugspannung geregelten Bewässerung - <i>Lycopersicon esculentum</i> – Schaltschwelle: 50 hPa	108

---

Tab. 13: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer nach der gemessenen Transpirationssumme gesteuerten Kultur - <i>Gerbera jamensonii</i> - Schaltschwelle: 700 ml Transpirations-summe	113
Tab. 14: Statistische Werte der täglichen Wasserumsätze einer zeitgesteuerten Bewässerung - <i>Gerbera jamensonii</i>	114
Tab. 15: Zugeführte und abgeführte Wassermengen der drei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei <i>Lycopersicon esculentum</i> (Tukey`s Test, 5%)	116
Tab. 16: Zugeführte und abgeführte Wassermengen der drei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei <i>Cucumis sativus</i>	119
Tab. 17: EC- und pH-Werte des Überschusswassers in drei Steuerungsmethoden bei <i>Lycopersicon esculentum</i> – EC- und pH-Werte der Nährlösung	126
Tab. 18: EC- und pH-Werte des Überschusswassers in drei Steuerungsmethoden bei <i>Cucumis sativus</i> – EC- und pH-Werte der Nährlösung	127
Tab. 19: Ertrag und Pflanzenwachstum von zwei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei zwei <i>Lycopersicon esculentum</i> Sorten (Mittelwerte in der gleichen Zeile mit dem gleichen Buchstaben differieren nicht signifikant bei 0,05 P nach der ANOVA Analyse)	131
Tab. 20: Ertrag und Pflanzenwachstum von zwei Steuerungsvarianten der Bewässerung bei zwei <i>Gerbera jamensonii</i> Sorten (Mittelwerte in der gleichen Zeile mit dem gleichen Buchstaben differieren nicht signifikant bei 0,05 P nach der ANOVA Analyse)	132
Tab. 22: Versuchsdaten zur Erfassung von Transpirationssummen bei <i>Capsicum anuum</i> mit Hilfe der Gaswechsellmethode	185
Tab. 23: Versuchsdaten zur Erfassung von Transpirationssummen bei <i>Lycopersicon esculentum</i> mit Hilfe der Gaswechsellmethode	185
Tab. 24: Versuchsdaten zur transpirationssummengesteuerten Bewässerung bei <i>Lycopersicon esculentum</i> unter hohen Einstrahlungsbedingungen	186
Tab. 25: Versuchsdaten zur bedarfsgerechten transpirationssummengesteuerte Bewässerung bei <i>Lycopersicon esculentum</i>	186

---

Tab. 26: Versuchsdaten zur Erfassung von Transpirationssummen bei <i>Gerbera jamensonii</i> mit Hilfe der Gaswechsellmessmethode	187
Tab. 27: Versuchsdaten zur transpirationssummengesteuerten Bewässerung bei <i>Gerbera jamensonii</i> unter hohen Einstrahlungsbedingungen	187
Tab. 28: Versuchsdaten zur bedarfsgerechten transpirationssummengesteuerten Bewässerung bei <i>Cucumis sativus</i>	188
Tab. 29: Technische Daten des Tensiometer „T3“ (Fa. UMS)	188
Tab. 30: Technische Daten des Phytomonitor EPM-2006 (Fa. IBS)	189
Tab. 31: Technische Daten der Sensoren SF-4 und SF-5 des Phytomonitor LPS-05MD (PHYTECH Ltd.)	189



## ANHANG C: TABELLEN UND ABBILDUNGEN ZUM VERSUCHS- AUFBAU

Tab. 22: Versuchsdaten zur Erfassung von Transpirationssummen bei *Capsicum annuum* mit Hilfe der Gaswechsellmethode

<b>Versuchsziel:</b>	<b><i>Erfassung von Transpirationssummen unter saugspannungsgeregelte Bewässerung bei Capsicum annuum</i></b>
Versuchdauer	bis zum 123. Kulturtag
Sorte	“Delgado”
Kulturmethode	Dünnschichtkultur auf Betontisch, 3 Rinnen je 14 Pflanzen/Tisch, Fassungsvermögen: 80 l/Rinne (ED 73)
Bewässerung	Tropfsystem (4 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Saugspannung (50 hPa), Ausbringmenge/Gießtakt: 5 l

Tab. 23: Versuchsdaten zur Erfassung von Transpirationssummen bei *Lycopersicon esculentum* mit Hilfe der Gaswechsellmethode

<b>Versuchsziel:</b>	<b><i>Erfassung von Transpirationssummen nach der Gaswechsellmethode bei Lycopersicon esculentum</i></b>
Versuchdauer	Bis zum 106. Kulturtag
Sorte	“Rondello”
Kulturmethode	Container auf Betontische, 36 Pflanzen /Tisch, Fassungsvermögen: 5l/Container (ED 73)
Bewässerung	Mikrokanalsystem (2 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach gemessener Transpirationssumme (Schaltschwelle: 7 l), Ausbringmenge/Gießtakt: 10 l

Tab. 24: Versuchsdaten zur transpirationssummengesteuerten Bewässerung bei *Lycopersicon esculentum* unter hohen Einstrahlungsbedingungen

<b>Versuchsziel</b>	<b>Automatische Bewässerungssteuerung nach gemessenen Transpirationssummen bei <i>Lycopersicon esculentum</i> unter hohen Einstrahlungsbedingungen</b>
Versuchdauer	bis zum 90. Kulturtag
Sorte	„Bolero“, „Rondello“
Kulturmethode	Container auf Tischen, 18 Pflanzen/Sorte am Tisch, Fassungsvermögen: 5 l/Container (ED 73)
Bewässerung	
Variante 1:	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach gemessener Transpirationssumme (Schaltschwelle: 3 l), Ausbringmenge/Gießtakt: 4 l
Variante 2:	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Saugspannung (Schaltschwelle: 50 hPa), Ausbringmenge/Gießtakt: 3 l

Tab. 25: Versuchsdaten zur bedarfsgerechten transpirationssummengesteuerte Bewässerung bei *Lycopersicon esculentum*

<b>Versuchsziel</b>	<b>Automatische Bewässerungssteuerung nach gemessenen Transpirationssummen ohne Überschusswasser bei <i>Lycopersicon esculentum</i></b>
Versuchdauer	bis zum 90. Kulturtag
Sorte	„Prospero“
Kulturmethode	Container auf Tischen, 36 Pflanzen/Tisch, Fassungsvermögen: 5 l/Container (ED 73)
Bewässerung	
Variante 1:	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach gemessener Transpirationssumme (Schaltschwelle: variierend), Ausbringmenge/Gießtakt:
Variante 2:	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Saugspannung (Schaltschwelle: 60 hPa), Ausbringmenge/Gießtakt: 3 l
Variante 3:	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Saugspannung (Schaltschwelle: 30 hPa), Ausbringmenge/Gießtakt: 3 l

Tab. 26: Versuchsdaten zur Erfassung von Transpirationssummen bei *Gerbera jamensonii* mit Hilfe der Gaswechselfmessmethode

<b>Versuchsziel:</b>	<b><i>Erfassung von Transpirationssummen nach der Gaswechselfmessmethode bei Gerbera jamensonii</i></b>
Versuchdauer	bis zum 30. Kulturtag (Pflanzen weiterkultiviert bis zum Frühjahr)
Sorte	“Molina”, „Lilabella“
Kulturmethode	Container auf Tischen, 16 Pflanzen/Sorte und Tisch, Fassungsvermögen: 12 l/Container (Perlit: 2-5 mm )
Bewässerung	Mikrokanalsystem Fa. Netafim(1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach gemessener Transpirationssumme (Schaltschwelle: 1,5 l),

Tab. 27: Versuchsdaten zur transpirationssummengesteuerten Bewässerung bei *Gerbera jamensonii* unter hohen Einstrahlungsbedingungen

<b>Versuchsziel</b>	<b><i>Automatische Bewässerungssteuerung mit definierten Überschuss bei Gerbera jamensonii unter hohen Einstrahlungsbedingungen</i></b>
Versuchdauer	Vom 208. bis zum 240 Kulturtag
Sorte	“Molina”, „Lilabella“
Kulturmethode	Container auf Tischen, 16 Pflanzen/Sorte und Tisch, Fassungsvermögen: 12 l/Container (Perlit: 2-5 mm )
Bewässerung	
Variante 1:	Mikrokanalsystem Fa. Netafim(1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach gemessener Transpirationssumme (Schaltschwelle: 0,7 l),
Variante 2:	Mikrokanalsystem Fa. Netafim(1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Zeit (Fa. Rainbird), Ausbringmenge/Gießtakt: 0,9 l

Tab. 28: Versuchsdaten zur bedarfsgerechten transpirationssummengesteuerten Bewässerung bei *Cucumis sativus*

<b>Versuchsziel</b>	<b>Automatische Bewässerungssteuerung nach gemessenen Transpirationssummen ohne Überschusswasser bei <i>Cucumis sativus</i></b>
Versuchdauer	Bis zum 84. Kulturtag
Sorte	“Stamm 8234, F1“
Kulturmethode	Container auf Tischen, 36 Pflanzen/Tisch, Fassungsvermögen: 5 l/Container (ED 73)
Bewässerung	
<i>Variante 1:</i>	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach gemessener Transpirationssumme (Schaltschwelle: variierend), Ausbringmenge/Gießtakt: 3 l
<i>Variante 2:</i>	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Saugspannung (Schaltschwelle: 60 hPa), Ausbringmenge/Gießtakt: 3 l
<i>Variante 3:</i>	Mikrokanalsystem (1 Tropfer/Pflanze), Steuerung nach Saugspannung (Schaltschwelle: 40 hPa), Ausbringmenge/Gießtakt: 3 l

Tab. 29: Technische Daten des Tensiometer „T3“ (Fa. UMS)

Messbereich	-100....0....700 hPa (=pF 2,8) abzüglich Schaftlänge: 1 cm = 1 hPa
Signal	-100 hPa = -10 mV ± 3 mV 0 hPa = 0 mV ± 3 mV 700 hPa = 70 mV exakte Werte lt. Kalibrierungsprotokoll Hydrostatisches Potenzial d. Schaftlänge muss je nach Einbaulage berücksichtigt werden
Impedanz	= 2,5 kΩ
Temperaturdrift	Temperaturkompensiert Typ. Drift 0,5 % FS über 25 K
Stabilität	Typ. Drift < 0,5 % p.a.

Tab. 30: Technische Daten des Phytomonitor EPM-2006 (Fa. IBS)

<b>Daten für die Gaswechsellmessung</b>	
Betriebstemperaturbereich	-10....60°C
Umgebungsfeuchtebereich	0....100%
Betriebsspannung des Messsystems	12VDC, 24VAC, 24VDC
Leistungsbedarf	80 W
Messfläche	Max. 360 cm²
Max. Anzahl der Messstellen	8
Min. Anzahl der Messstellen	4
Fördervolumenstrom Stufe 1	80....100 cm³/s
Fördervolumenstrom Stufe 2	110....150 cm³/s
Differenz der Fördermenge zwischen den Küvetten	<2,5 %
Toleranz der Verdunstungsmessung	0,8 mg/m²s
Prozentualer Messfehler der Transpirationsmessung	<4 %

Tab. 31: Technische Daten der Sensoren SF-4 und SF-5 des Phytomonitor LPS-05MD (PHYTECH Ltd.)

	<b>SF-4</b>	<b>SF-5</b>
Messungsbereich	Nicht spezifiziert (approximativer Bereich ± 3 ml/h)	
Messgenauigkeit	Nicht spezifiziert	
Erwärmungsfähigkeit	30 mW	30 mW
Geeignete Stängel-dimension	1 – 5 mm	4 – 10 mm
Grunddimensionen der Sensoren	30 x 30 x 40 mm³	30 x 35 x 40 mm³
Kabellänge	4-Kabel (2 m max. Länge)	



Abb. 62: Offene Bewässerungsführung einer Rinnenkultur auf Betontische bei *Capsicum annuum*



Abb. 63: Klimamessung am Paprikabestand durch das P-TF Gerät (Fa. POSITRONIK)





Abb. 64: a) Offene Bewässerungsführung von Containerkulturen auf Betontische von *Lycopersicon esculentum* und b) Transpirationsmessung durch den Phytomonitor „EPM 2006“



Abb. 65: Offene Bewässerungsführung von Containerkulturen in Perlit auf Tischen bei *Gerbera jamensonii*



Abb. 66: Messung der Globalstrahlung am Gerberabestand durch das Pyranometer CM5 (Fa. KIPP und ZONEN)

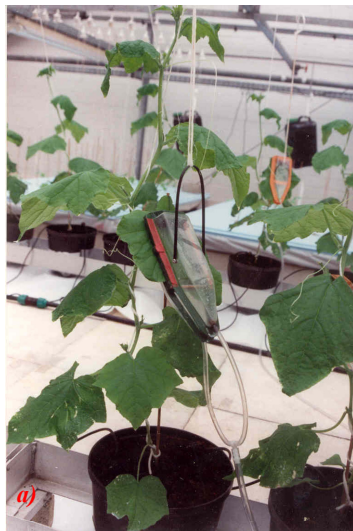


Abb. 67: a) Transpirationsmessung über das Küvettenprinzip und b) Saugspannungsmessung über das Tensiometerprinzip an einer Containerkultur auf Tische bei *Cucumis sativus*



## ANHANG D: VERZEICHNIS DER VERWENDETEN GRÖßEN UND ABKÜRZUNGEN

### a) GRÖßEN, KOEFFIZIENTEN UND GLEICHUNGSPARAMETER

ZEICHEN	BENENNUNG	EINHEIT
a	Faktor für die phänologische Entwicklung	-
A'	Verfügbare Energie	mJ/m <sup>2</sup>
A	Überschusswassermenge zwischen zwei Gießtakten	l
a(h)	Nicht dimensionale Funktion des Wasserdrucks im Boden	-
A, B	Gleichungsparameter	B in J/m <sup>2</sup> s
a, b	Koeffizienten	-
a', b'	Faktoren eines ET Modells, als Funktion des LAI und der Widerstände	-
a <sub>T</sub>	Empirischer Kulturfaktor	mm cm <sup>2</sup> J
B' <sub>w</sub>	vorbestimmte Gießmenge (im Steueralgorithmus)	l
b <sub>T</sub>	Empirischer Kulturfaktor	mm min/K
B <sub>w</sub>	ausgebrachte Gießmenge (Einlesen der Wasseruhr)	l
C	Koeffizient, als Funktion der Widerstände und der Wetterkondition	-
C1	Absorptionsrate des Bedachungsmaterials	-
C2	Absorptionsrate der Schattierung	-
c <sub>i</sub>	Konzentration einer Wassermenge zur Dichte des gesamten Gasmischungs der Umgebungsluft	kg/kg
c <sub>p</sub>	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	J/(kg K)
CWSI	Kulturwasserstress-Index	-
DM	„degree- minutes“, Temperaturdifferenz zwischen der Luft und dem Heizungsrohr, integriert über die Zeit	K/min
Dn	Dicke der Bodenschicht n	m
e	aktueller Dampfdruck des Wassers	Pa
E(i)	Transpirationsrate	kg/m <sup>2</sup> s
e	Dampfdruck der Luft	kPa
e*	Sättigungsdampfdruck der Luft	kPa
EC	elektrische Leitfähigkeit	dS/m
E <sub>eq</sub>	Gleichgewichtstranspiration	mm
E <sub>im</sub>	verminderte Transpiration	mm
ET	Evapotranspiration	mm
ET <sub>p</sub>	potentielle ET	mm
f	Faktor zur Beschreibung der Strahlungsäquivalenz der ET	-

$F_b$	Blattfläche	$m^2$
$F_g$	Grundfläche	$m^2$
$f_i()$	mathematische Funktionen	-
$F_K$	eingeschlossene Blattfläche in den Küvetten	$m^2$
$g$	Bodenwärmefluss	$W/m^2$
$g(i)$	Leitfähigkeit für den Wasserdampftransport	$m/s$
$g_b$	Blattleitfähigkeit	$m/s$
$g_s$	Stomatärer Leitwert	$m/s$
$g_{Trans}$	Transpirationsleitfähigkeit	$m/s$
$h$	Bodenwasserdruck	Pa
$H$	Sensibler Wärmefluss	$W/m^2$
$h'$	Feuchtigkeit der Dampfphase	-
$h_c$	Wärmetransportkoeffizient	-
$IR$	Applikationsrate des Wassers	-
$K$	Lichtschwächungskoeffizient	-
$K_B$	Koeffizient der Wasserbilanz	l
$LAI/L$	Blattflächenindex	$m^2/m^2$
$Le$	Lewiszahl (Ähnlichkeitszahl)	-
$M$	aktuelle Transpirationssumme	l
$M'$	angestrebte Transpirationssummen zur Bewässerungssteuerung (Schaltschwelle)	l
$m_l$	Förderleistung der Pumpe (EPM)	$m^3/s$
$m_t$	Transpirationsmassenfluss der in den Küvetten eingeschlossenen Blätter	$kg/m^2s$
$m_v$	modellierte Transpirationsmassenflussdichte	$kg/m^2s$
$M_w$	molekulares Gewicht des Wassers	-
$n$	Bodenschicht	-
$p_D$	aktueller Partialdampfdruck	Pa
$Ph$	Photosynthese	$\mu molCO_2m^{-2}s^{-1}$
$p_i$	Partialdruck einer Wasserdampfmenge	Pa
$p_l$	Partialdampfdruck der Luft	Pa
$p_s$	Sättigungspartialdampfdruck	Pa
$p_s(t_1)$	Sättigungsdampfdruck bei der Gewächshaustemperatur	Pa
$p_s(t_2)$	Sättigungsdampfdruck in der Dewarkammer (nach der Erwärmung)	Pa
$p_{s,b}$	Sättigungspartialdampfdruck der Luft bei der Blatttemperatur	Pa
$q$	Wasserfluss vom Boden zur Pflanze	-
$q_t$	Transpiration in Wärmeäquivalent	ml
$q_v$	Spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser	$kJ/kg$
$R$	allgemeine Gaskonstante	$J/mol\ K$

$R'_s$	Kurzwellige Strahlung, die die Bodenoberfläche eintrifft	$W/m^2$
$R_a$	Globalstrahlung außerhalb des Gewächshauses	$W/m^2$
$r_a$	aerodynamischer Widerstand	$s/m$
$r_b$	Blattwiderstand	$s/m$
$r_{Bw}$	Nachleitwiderstände des Bodens	$s/m$
$r_c$	Gesamtwiderstand des Wassertransports einer Kultur	$s/m$
$r_D$	Diffusionswiderstand	$s/m$
RH	rel. Luftfeuchte	%
$rh_{cor}$	rel. Feuchte im Gewächshaus	%
$rh_{mess}$	rel. Feuchte gemessen in der Dewarkamer (nach der Erwärmung)	%
$R_i$	Innenstrahlung	$J/m^2s$
$r_k$	kutikulärer Widerstand	$s/m$
$r_{l.b.}$	Grenzschichtwiderstand	$s/m$
$r_{lh}$	Widerstand beim Transport durch die interzelluläre Hohlräume des Blattes	$s/m$
$r_{min}$	Minimaler Wert des stomatären Widerstandes	$s/m$
$R_n$	Nettostrahlung	$W/m^2$
$r_o$	Oberflächenwiderstand	$s/m$
$r_{pw}$	Phasenwechselwiderstand	$s/m$
$r_s$	stomatärer Widerstand	$s/m$
$R_s$	Globalstrahlung	$W/m^2$
$RS_{\odot}$	im Gewächshaus infiltrierte Strahlung	$W/m^2$
$R_t$	tägliche Gesamtstrahlung	$cal/cm^2 \text{ Tag}$
$r_{total}$	Gesamter Pflanzenorganwiderstand zum Wasserfluss	$s/m$
S	Pflanzliche Wasserextraktion aus den Boden	$cm^3_{H_2O}/cm^3_{Boden} d$
S	aktueller Saugspannungswert (Istwert)	hPa
$S'$	Schaltsschwelle einer nach Tensiometer gesteuerten Bewässerung	hPa
$S_M$	maximale Wasserextraktionsmenge der Wurzel	-
T	absolute Temperatur	(° K)
t	Zeit	s
$t_b$	Blatttemperatur	° C
$T_d$	stündliche Durchschnittstemperatur im Dewpoint	° C
$t_G$	Gießzeit	s
$T_{hr}$	stündliche Durchschnittstemperatur	° C
$t_l$	Lufttemperatur	° C
Tr	Transpiration	mm
$Tr_p$	potentielle Transpiration	mm
$Tr_R$	Transpirationsrate	$kg/m^2s$

$t_s$	Sperrzeit nach Abschluss eines Gießtaktes	s
$U$	täglicher Wasserverbrauch einer Kultur	mm/Tag
$V$	Geschwindigkeit	m/s
$VCD_{l-b}$	Wasserdampfkonzentrationsdifferenz	g/kg
$VPD_l$	Dampfdruckdefizit	Pa
$VPd_{l-b}$	Wasserdampfdruckdifferenz	Pa
$WUE_E$	Wassernutzungskoeffizient des Ertrags	g/kg H <sub>2</sub> O
$WUE_P$	Wassernutzungskoeffizient der Produktivität	g TS/kg H <sub>2</sub> O
$WUE_{Ph}$	Wassernutzungskoeffizient der Photosynthese oder Transpirationseffizienz (auch ITE oder $W_t$ )	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ / $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}$
$WUE_T$	Verhältnis der Transpiration zur gesamten Bewässerungsmenge	l
$x(t_i)$	Wasserdampfkonzentration der Luft über die Grenzschicht am Blatt	kg/kg
$x_c$	effektive Dampfkonzentration	kg/m <sup>3</sup>
$x_k$	Absolute Feuchtekonzentration der Küvettenluft (EPM)	kg/kg
$x_l$	Wasserdampfkonzentration der Gewächshausluft	kg/m <sup>3</sup>
$x_l^*$	Sättigungsdampfkonzentration der Luft im Gewächshaus	kg/m <sup>3</sup>
$x_r$	absolute Feuchtekonzentration der Referenzluft-Gewächshausluft (EPM)	kg/m <sup>3</sup>
$x_s(t_b)$	Sättigungsdampfkonzentration der Luft in den Interzellularen Hohlräumen bei Blatttemperatur	kg/kg
$x_{sb}$	Sättigungsdampfkonzentration der Luft bei Blatttemperatur	kg/m <sup>3</sup>
$Z_L$	kritische Tiefe der genässten Bodenfront	m
$\gamma$	psychrometrische Konstante	hPa/K
$\Delta$	Steigung der Sättigungsdampfdruck-Temperatur Kurve	hPa/K
$\Delta p(i)$	Dampfdruckdifferenz	kg/kg
$\Delta \Psi$	Wasserpotentialdifferenz	J/kg oder Pa
$\varepsilon$	Wechselrate des latenten Wärmeinhaltes zum sensiblen der gesättigten Luft	-
$\Theta_{av}$	durchschnittlich volumetrischer Wassergehalt	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\Theta_i$	Anfangswassergehalt des Bodens	-
$\lambda_b$	stomatärer Leitwert	m/s
$\lambda E$	latenter Wärmefluss	W/m <sup>2</sup>
$\xi$	Wasserdeckungsverhältnis, als Kriterium für die relative Stomataöffnung	-
$\rho_l$	Dichte der Luft	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Transportkoeffizient	-
$\Sigma B$	täglich zugeführte Wassermenge	l
$\Sigma T$	tägliche Bestandstranspirationssumme	l
$\varphi$	relative Luftfeuchte	-
$\Psi_B$	Gesamtpotenzial des Bodens	J/kg oder Pa
$\Psi_b$	Blattwasserpotenzial	Pa

---

$\Psi_{Bl}$	Wasserpotenzial der Pflanze	J/kg oder Pa
$\Psi_g$	gravimetrisches Potenzial	J/kg oder Pa
$\Psi_m$	Matrixpotenzial	J/kg oder Pa
$\Psi_p$	piezometrisches Potenzial	J/kg oder Pa
$\Psi_w$	Wasserpotential der Pflanzenstelle	J/kg oder Pa
$\Psi_{\pi}$	osmotisches Wasserpotenzial	J/kg oder Pa
$\Omega$	Blattentkoppelungsfaktor	-

---

## b) ABKÜRZUNGEN

---

<b>ZEICHEN</b>	<b>BENENNUNG</b>
ABA	Abscisinsäure
FD-Sensor	Frequency Domain Sensor
CTEB-Model	Canopy, Temperature, Energy Balance Model
GS	Grenzschicht
HPV	Methode der Wärmepulsgeschwindigkeiten
IRT	Infrarotthermometer
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
MIMO-Systeme	Multi-Input, Multi-Output-Systeme
MINAS	Mineralerklärungs-system
NFT-Technik	Nährlösungsfilntechnik
NMR	Magnetische Kernresonanz
PM Model	Penman-Monteith Model
PPH	Plant Plane Hydroponic
PRD	Partial Rootzone Drying
PUR	Polyurethanmatten
PWP	Permanenter Welkenpunkt (Pa)
RATP-Model	Radiation, Absorption, Transpiration, Photosynthesis Model
SPAC-System	Soil-Plant-Atmosphere System
TDR-Sensor	Time Domain Reflektometry
THB	Methode der thermischen Wärmebilanz
EU	Europäische Union

---

## ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, 31.08.2005

---



## BEDANKUNG

Herrn Prof. U. Schmidt danke ich für die Überlassung des Themas, den gewährten Freiraum bei der Gestaltung der Arbeitsaufgabe sowie für seine zahlreiche wertvolle Hinweise und Ratschläge bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. A. Ekonomou, der Fakultät für Agrarwirtschaft der Aristoteles-Universität zu Thessaloniki, danke ich für seine Interesse an der Arbeit und sein starkes Engagement für die Durchführung der Versuche in der Versuchsstation in Thessaloniki.

Des weiteren danke ich allen Mitarbeitern des Institutes für Gartenbautechnik der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt Universität zu Berlin die bei der Betreuung und dem Aufbau der experimentellen Untersuchungen zur Hilfe standen.

Meiner Familie danke ich für ihre Unterstützung und ihre Geduld; ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Als letztes danke ich mich dem Land Berlin für die Vergabe eines Promotionsstipendium nach dem Gesetz zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses (NaFöG).